

Инженерная школа ядерных технологий

Направление подготовки 14.03.02 Ядерная физика и технологии

Отделение ядерно-топливного цикла

### БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
<b>Влияние диаметра отверстий в горизонтальных ребрах вертикальной погружной емкости на динамику ее заполнения десублимированным UF<sub>6</sub></b>

УДК 621.642.3:519.876

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А7Д	Турбина Ирина Анатольевна		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень. звание	Подпись	Дата
Профессор ОЯТЦ ИЯТШ	Орлов А. А.	Д.Т.Н., профессор		

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент. ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень. звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Клемашева Е.И.	К.Э.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень. звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Тимченко С.Н.	К.Т.Н.		

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень. звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Бычков П.Н.	К.Т.Н.		

## Результаты обучения по ООП

Код	Результат освоения ООП
P1	Демонстрировать культуру мышления, способность к обобщению, анализу, восприятию информации, постановке цели и выбору путей ее достижения; стремления к саморазвитию, повышению своей квалификации и мастерства; владение основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации, навыки работы с компьютером как средством управления информацией; способность работы с информацией в глобальных компьютерных сетях.
P2	Способность логически верно, аргументировано и ясно строить устную и письменную речь; критически оценивать свои достоинства и недостатки, намечать пути и выбирать средства развития достоинств и устранения недостатков.
P3	Готовностью к кооперации с коллегами, работе в коллективе; к организации работы малых коллективов исполнителей, планированию работы персонала и фондов оплаты труда; генерировать организационно-управленческих решения в нестандартных ситуациях и нести за них ответственность; к разработке оперативных планов работы первичных производственных подразделений; осуществлению и анализу исследовательской и технологической деятельности как объекта управления
P4	Умение использовать нормативные правовые документы в своей деятельности; использовать основные положения и методы социальных, гуманитарных и экономических наук при решении социальных и профессиональных задач, анализировать социально-значимые проблемы и процессы, осознавать социальную значимость своей будущей профессии, обладать высокой мотивацией к выполнению профессиональной деятельности
P5	Владеть одним из иностранных языков на уровне не ниже разговорного.
P6	Владеть средствами самостоятельного, методически правильного использования методов физического воспитания и укрепления здоровья, готов к достижению должного уровня физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности.
P7	Использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования в физике кинетических явлений, наукоёмких промышленных технологиях (разделения изотопов, жидких и газовых смесей, получения высокочистых веществ).
P8	Владеть основными методами защиты производственного персонала и населения от возможных последствий аварий, катастроф, стихийных бедствий; быть готовым к оценке ядерной и радиационной безопасности, к оценке воздействия на окружающую среду, к контролю за соблюдением экологической безопасности, техники безопасности, норм и правил производственной санитарии, пожарной, радиационной и ядерной безопасности, норм охраны труда; к контролю соответствия разрабатываемых проектов и технической документации стандартам, техническим условиям, требованиям безопасности и другим нормативным документам; за соблюдением технологической дисциплины и обслуживанию технологического оборудования; и к организации защиты объектов интеллектуальной собственности и результатов исследований и разработок как коммерческой тайны предприятия; и понимать сущность и значение информации в развитии современного информационного общества, сознавать опасности и угрозы, возникающие в этом процессе, соблюдать основные требования информационной безопасности, в том числе защиты государственной тайны).
P9	Уметь производить расчет и проектирование деталей и узлов приборов и установок в соответствии с техническим заданием с использованием стандартных средств автоматизации проектирования; разрабатывать проектную и рабочую техническую документацию, оформление законченных проектно-конструкторских работ; проводить предварительного технико-экономического обоснования проектных расчетов установок и приборов.
P10	Готовность к эксплуатации современного физического оборудования и приборов для экспресс-контроля технологических параметров, мониторинга технического состояния технологического оборудования, переработки, утилизации и обезвреживания промышленных отходов, к освоению технологических процессов в ходе подготовки

Код	Результат освоения ООП
	производства новых материалов, приборов, установок и систем; к наладке, настройке, регулировке и опытной проверке оборудования и программных средств производства разделения изотопов, тонкой очистки, переработки веществ, программного обеспечения тренажерных комплексов для поддержания готовности технологического персонала предприятия к работе в нештатных и критических ситуациях, к монтажу, наладке, испытанию и сдаче в эксплуатацию опытных образцов приборов, установок, узлов, систем и деталей плазменных установок, приборов анализа и систем управления разделительными каскадами.
P11	Способность к организации метрологического обеспечения технологических процессов, к использованию типовых методов контроля качества выпускаемой продукции; и к оценке инновационного потенциала новой продукции, анализу рынка изотопномодифицированной, мембранной продукции, стабильных изотопов и услуг.
P12	Способность использовать информационные технологии при разработке новых установок, материалов и приборов, к сбору и анализу информационных исходных данных для проектирования приборов и установок; технические средства для измерения основных параметров объектов исследования, к подготовке данных для составления обзоров, отчетов и научных публикаций; к составлению отчета по выполненному заданию, к участию во внедрении результатов исследований и разработок; и проведения математического моделирования процессов и объектов на базе стандартных пакетов автоматизированного проектирования и исследований в области физики селективных процессов, разделения изотопных и молекулярных смесей.
P13	Уметь готовить исходные данные для выбора и обоснования научно-технических и организационных решений на основе экономического анализа; использовать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по тематике исследования, современные компьютерные технологии и базы данных в области разделения изотопных и молекулярных смесей, молекулярно-селективных технологий и выполнять работы по стандартизации и подготовке к сертификации технических средств, систем, процессов, оборудования и материалов.
P14	Готовность к проведению физических экспериментов по заданной методике, составлению описания проводимых исследований и анализу результатов; анализу затрат и результатов деятельности производственных подразделений; к разработки способов применения ядерно-энергетических, плазменных, лазерных, СВЧ и мощных импульсных установок, электронных, нейтронных и протонных пучков, методов экспериментальной физики в решении технических, технологических и медицинских проблем получения моноизотопной и изотопно-модифицированной продукции, глубокой очистки трудно разделяемых веществ.
P15	Способность к приемке и освоению вводимого оборудования, составлению инструкций по эксплуатации оборудования и программ испытаний; к составлению технической документации (графиков работ, инструкций, планов, смет, заявок на материалы, оборудование), а также установленной отчетности по утвержденным формам; и к организации рабочих мест, их техническому оснащению, размещению технологического оборудования плазменных, мембранных, ионообменных установок, а также приборов анализа и систем управления разделительными каскадами.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа ядерных технологий

Направление подготовки 14.03.02 Ядерная физика и технологии

Отделение ядерно-топливного цикла

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель ООП

\_\_\_\_\_ Бычков П.Н.  
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

### ЗАДАНИЕ

**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

бакалаврской работы
---------------------

Студенту:

Группа	ФИО
0А7Д	Турбина Ирина Анатольевна

Тема работы:

<b>Влияние диаметра отверстий в горизонтальных ребрах вертикальной погружной емкости на динамику ее заполнения десублимированным UF<sub>6</sub></b>	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	22.01.2021

Срок сдачи студентом выполненной работы:	24.06.2021
--	------------

### ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<b>Исходные данные к работе</b>	Задание. Литературные источники по основам процесса десублимации UF <sub>6</sub> . Математическая модель нестационарного процесса десублимации UF <sub>6</sub> в вертикальных погружных емкостях.
<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	1. Обзор и анализ литературы 2. Описание математической модели десублимации в вертикальные погружные емкости 3. Результаты расчетов, их анализ 4. Экономический расчет 5. Охрана труда и техника безопасности 6. Выводы. Заключение

<b>Перечень графического материала</b>	<p>Рисунки: Классификация объемных десублиматоров; классификация поверхностных десублиматоров; изменение пересыщения потока пара при движении по трубе; вертикальная погружная емкость с горизонтальным оребрением, схема разбиения расчетной области на подобласти; конфигурации центрального отверстия в ребрах емкости: цилиндр, усеченный конус, усеченный конус и цилиндр, два цилиндра разного диаметра, три цилиндра; скриншот результата расчета десублимации UF<sub>6</sub>.</p> <p>Графики: Зависимость средней производительности и времени заполнения емкости от диаметра центрального отверстия ребер.</p>
--	---

#### **Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы**

<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
Влияние диаметра отверстий в горизонтальных ребрах вертикальной погружной емкости на динамику ее заполнения десублимированным UF <sub>6</sub>	Профессор ОЯТЦ, д.т.н. Орлов Алексей Алексеевич
Анализ полученных данных	
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Доцент ОСГН ШБИП, к.э.н. Клемашева Елена Игоревна
Социальная ответственность	Доцент ОЯТЦ ИЯТШ, к.т.н. Тимченко Сергей Николаевич

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	01.02.2021
---	------------

#### **Задание выдал руководитель:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Профессор ОЯТЦ ИЯТШ	Орлов А. А.	д.т.н., профессор		

#### **Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
0А7Д	Турбина И. А.		

# ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
0А7Д	Турбина Ирина Анатольевна

Школа	ИШЯТ	Отделение школы (НОЦ)	ОЯТЦ
Уровень образования	бакалавр	Направление/специальность	14.03.02 «Ядерные физика и технологии»

## Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Бюджет проекта – не более 220545,6 руб., в т.ч. затраты по оплате труда – не более 146654,2 руб.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Районный коэффициент для города Томска равен 1,3. Премимальный коэффициент равен 0,3. Тариф на промышленную электроэнергию равен 3,66 руб. кВт·час.
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды- 30,2%

## Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Оценочная карта конкурентных технических решений SWOT-анализ
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	Структура работ в рамках научного исследования. Определение трудоемкости работ и разработка графика проведения научного исследования. Бюджет научно-технического исследования
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	Определение интегрального показателя эффективности, ресурсоэффективности вариантов исполнения ВКР, интегрального показателя эффективности вариантов исполнения НИР.

## Перечень графического материала:

Карта сегментирования;  
матрица SWOT-анализа;  
план-график проведения научного исследования.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	15.02.2021
--	------------

## Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОСГН ШБИП	Клемашева Елена Игоревна	К.Э.Н.		

## Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А7Д	Турбина Ирина Анатольевна		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
0А7Д	Турбина Ирина Анатольевна

Инженерная школа	ИШЯТ	Отделение	ОЯТЦ
Уровень образования	бакалавр	Направление	14.03.02 «Ядерные физика и технологии»

### Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования) на предмет возникновения:	Вредных проявлений факторов производственной среды: микроклимат, шум, вибрация, освещение, электромагнитные поля и ионизирующее излучение от ПЭВМ; опасных проявлений факторов производственной среды: электрического тока, пожарная и взрывная безопасность.
2. Перечень законодательных и нормативных документов по теме	Требования охраны труда при работе на ПЭВМ; электробезопасность; пожаро-взрывобезопасность.
<b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</b>	
1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:	Действие фактора на организм человека; приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); предлагаемые средства защиты (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защиты).
2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности	Электробезопасность (причины, средства защиты); пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	13.03.2021
--	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Тимченко Сергей Николаевич	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А7Д	Турбина Ирина Анатольевна		

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит: 93 страницы, 10 рисунков, 27 таблиц, 46 источников, 57 формул.

Ключевые слова: гексафторид урана, хладагент, десублимация, тепло- и массоперенос, математическая модель, геометрия емкости, нестационарный процесс.

Объект исследования: процесс десублимации  $UF_6$  в вертикальной погружной емкости с горизонтальным ребрением объемом  $0,06 \text{ м}^3$ .

Цель работы: исследование влияния диаметра центрального отверстия горизонтальных ребер емкости на динамику ее заполнения десублимированным  $UF_6$ , для определения возможности повышения средней производительности данной емкости.

В процессе исследования с использованием двухмерной математической модели процесса десублимации  $UF_6$  проведены расчеты динамики заполнения вертикальной погружной емкости с горизонтальным ребрением объемом  $0,06 \text{ м}^3$  при изменении диаметра отверстия в ребрах. Рассчитаны 5 конфигураций центральных отверстий: цилиндр, усеченный конус, усеченный конус и цилиндр, два цилиндра разного диаметра, три цилиндра разного диаметра.

В результате исследования установлено, что емкость объемом  $0,06 \text{ м}^3$  имеет максимальную среднюю производительность  $4,8328 \text{ г/с}$  при конфигурации в виде усеченного конуса с цилиндром, имеющего диаметр  $6,4 \cdot 10^{-2} \text{ м}$  на 1-ом ребре и  $4,4 \cdot 10^{-2} \text{ м}$  на ребрах со 2-го по 13-ое.

Показано, что увеличение диаметра отверстия в горизонтальных ребрах с  $6,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}$  до  $6,4 \cdot 10^{-2} \text{ м}$  позволяет увеличить среднюю производительность емкости на  $2,80 \%$ , а использование других конфигураций максимум на  $3,34\%$ , то есть незначительно.

Для простоты изготовления данной емкости рекомендовано использовать конфигурацию центральных отверстий в виде цилиндра с диаметром  $6,4 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ .

Область применения: полученные в ходе численного моделирования результаты могут быть использованы в АО «ПО ЭХЗ» при оптимизации конструкции емкости объемом  $0,06 \text{ м}^3$ .



## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ .....	12
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССА ДЕСУБЛИМАЦИИ.....	13
1.1 Сублимационно-десублимационные аппараты.....	13
1.1.1 Способы десублимации веществ.....	13
1.1.2 Классификация объемных десублиматоров .....	14
1.1.3 Классификация поверхностных десублиматоров .....	16
1.1.4 Сублимационно-десублимационные аппараты для ядерно-опасных веществ .....	18
1.2 Физическая и математическая модели процесса десублимации .....	18
1.3 Пересыщение пара .....	21
1.4 Расчет температуры десублимации .....	22
1.5 Расчет критической степени пересыщения .....	25
1.7 Скорость образования зародышей .....	27
1.8 Критерий, определяющий характер процесса десублимации .....	28
2 ОПИСАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ .....	30
2.1 Допущения двухмерной модели .....	30
2.2 Объект исследования .....	31
2.3 Уравнения газовой динамики.....	32
3 ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ .....	34
3.1 Расчет динамики заполнения емкости объемом 0,06 м <sup>3</sup> с горизонтальным оребрением .....	34
3.1.1 Расчет конфигурации центральных отверстий ребер в виде цилиндра ..	36
3.1.2 Расчет конфигурации центральных отверстий ребер емкости в виде усеченного конуса .....	41
3.1.3 Расчет конфигурации центральных отверстий ребер емкости в виде усеченного конуса и цилиндра .....	43
3.1.4 Расчет конфигурации центральных отверстий ребер емкости в виде двух цилиндров разного диаметра .....	47

3.1.5 Расчет конфигурации центральных отверстий ребер емкости в виде трех цилиндров разного диаметра .....	48
3.2 Сравнение полученных результатов .....	49
4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ .....	51
4.1 Потенциальные потребители результатов исследования .....	51
4.1.2 Анализ конкурентных технических решений.....	52
4.1.3 SWOT-анализ.....	55
4.2 Планирование научно-исследовательской работы .....	58
4.2.1 Иерархическая структура работ проекта .....	58
4.2.2 Контрольные события проекта.....	59
4.2.3 Определение трудоемкости выполнения НИР .....	60
4.3 Бюджет научного исследования.....	66
4.3.1 Расчёт материальных затрат.....	66
4.3.2 Основная заработная плата исполнителей темы .....	67
4.3.2 Дополнительная заработная плата исполнителей темы .....	69
4.3.3 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления) .....	70
4.3.4 Накладные расходы .....	70
4.3.5 Формирование бюджета затрат исследовательского проекта .....	71
4.4 Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности проекта .....	72
4.5 Выводы по разделу «Финансовый менеджмент ресурсоэффективность и ресурсосбережение».....	74
5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ.....	76
5.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов.....	76
5.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ПЭВМ .....	78
5.2.1 Организационные мероприятия .....	78
5.2.2 Технические мероприятия .....	79
5.2.3 Условия безопасной работы .....	81

5.3 Электробезопасность .....	83
5.4 Пожарная и взрывная безопасность.....	85
5.5 Выводы по разделу «Социальная ответственность».....	87
Выводы .....	88
Список используемых источников.....	89

## Введение

Десублимация – это процесс перехода вещества из газообразного состояния в твердое (конденсация).

Этот процесс широко используется в различных отраслях народного хозяйства от медицины и фармацевтики до ядерной энергетики. На разделительных предприятиях в результате обогащения получают выходные потоки легкой и тяжелой фракции, которые десублимируют в погружные вертикальные или горизонтальные емкости. Обогащенный  $UF_6$  отправляется на склад для хранения, а обогащенный – на предприятия по изготовлению ТВЭЛов.

В настоящее время все большее число стран стремится иметь технологии обогащения изотопов урана, параллельно с этим возрастает конкуренция между уже существующими производителями ядерного топлива. В связи с этим на разделительных предприятиях России старые газовые центрифуги заменяю на новые, более производительные, что придает актуальность работам, направленным на исследование и интенсификацию процесса десублимации  $UF_6$ .

Повысить производительность процесса десублимации можно путем оптимизации режима работы емкостей, обеспечив максимальную скорость десублимации  $UF_6$  и более полное их заполнение; совершенствования конструкции транспортных емкостей либо проектирование коллекторов десублимации повышенной производительности.

Указанные задачи нецелесообразно решать экспериментальным путем, так как возможности такого подхода ограничены и требуют проведения дорогостоящих и длительных экспериментов.

Для решения этих задач целесообразно использовать возможности математического моделирования.

# **1 Теоретические основы процесса десублимации**

## **1.1 Сублимационно-десублимационные аппараты**

### **1.1.1 Способы десублимации веществ**

Процесс сублимации вещества осуществляется с его поверхностного слоя, а десублимации – либо на поверхности (неподвижной или подвижной) твердой фазы, либо в объеме газовой фазы. Принципиального различия между этими двумя способами выделения вещества нет, т.к. в конечном счете, процесс выделения происходит на поверхности твердой фазы. Однако в случае объемного выделения теплообмен с внешней средой происходит либо через газовую фазу конвекцией, либо излучением. При выделении на поверхности тепло отводится в результате контакта десублимата с охлаждаемой поверхностью. Кроме того, десублимации предшествует пересыщение вещества в парогазовой (или газовой) смеси и это пересыщение создается различными способами: в объеме – это пересыщение в газовой фазе по отношению к равновесной концентрации вблизи поверхности частиц, имеющих почти ту же температуру, что и газ. При этом пересыщение в рабочем объеме десублиматора может создаваться одним из следующих способов [1, 2]: смешением горячей парогазовой смеси с охлаждающим газом, протеканием химической реакции, адиабатическим расширением газов.

При выделении продукта на поверхности пересыщение обеспечивается отводом тепла внешней средой. В этом случае поверхность имеет значительно более низкую температуру, чем газ, и по отношению к этой температуре основной объем газа значительно пересыщен. По мере выделения твердой фазы слой десублимата становится толще, изменяются его свойства и, соответственно, изменяется температура поверхности и величина пересыщения.

Подробно сублимация и десублимация как процессы химической технологии описаны в литературе [1,2].

### 1.1.2 Классификация объемных десублиматоров

Процесс десублимации происходит в результате пересыщения парогазовой смеси. Этот процесс сопровождается выделением твердой фазы в виде дисперсной системы, состоящей из мельчайших частиц, находящихся в газе [1].

Понижение температуры смеси приводит к образованию дисперсной фазы (аэрозоля), равновесная концентрация пара при этом соответствует этой температуре и может быть ниже фактической его концентрации. Охлаждение газа происходит при его смешении с более холодным потоком и отводе тепла через стенку, вдоль которой движется газовый поток, его адиабатическом расширении. При высокой температуре газа тепло выделяется в окружающую среду с более низкой температурой.

Все разнообразие аппаратного оформления десублиматоров, в основе работы которых используется объемная десублимация, приведено на рисунке 1.1.



Рисунок 1.1 – Классификация объемных десублиматоров

Объемная десублимация применяется для выделения веществ, если применение других методов десублимации невозможно, например, из-за высокой температуры процесса. Десублимация протекает в специальных объемных десублиматорах или в аппаратах с охлаждаемыми стенками при медленном движении парогазовой смеси. Стоит заметить, что при небольших скоростях потока, часть продукта покидает десублиматор, поэтому для более полного извлечения вещества устанавливают дополнительные аппараты инерционного осаждения, в которых изменение скорости и направления движения парогазовой смеси обеспечивают отделение частиц и их осаждение в нижней части аппарата.

В данных аппаратах наряду с объемной десублимацией происходит десублимация на поверхности элементов питания, что является нежелательным для данного процесса. Соотношение этих процессов напрямую зависит от линейной скорости парогазовой смеси. При большой скорости газов увеличивается количество продукта на охлаждаемых стенках десублиматора, который имеет большую плотность. При малых скоростях слой имеет рыхлую структуру.

Объемную десублимацию осуществляют путем смешивания парогазовой смеси с газообразным хладагентом. При этом часть десублимата получается в виде трудно уловимого аэрозоля, что не позволяет получить степень выделения десублимата выше 96 % [3, 4].

Недостатком объемной десублимации является существенное разбавление парогазовой смеси, затрудняющее последующее отделение десублимата.

Объемная десублимация эффективна для выделения веществ из концентрированных смесей или пара, в том случае, когда целесообразно применять рециркуляцию газового потока. При этом унесенный газовым потоком целевой продукт – десублимат повторно возвращается в цикл, что исключает его потери.

Десублимируемая газовая смесь смешивается с холодным инертным газом, при этом образуются кристаллы, задерживаемые на предназначенных для этого фильтрах или в отстойнике. Избыток инертного газа охлаждается в теплообменнике и рециркулирует в системе. К достоинствам данных схем можно отнести возможность регулирования дисперсного состава образующегося десублимата изменением температуры инертного газа или соотношения пар – инертный газ. Для предотвращения поверхностной десублимации необходимо периодически очищать охлаждаемую поверхность от десублимата.

### **1.1.3 Классификация поверхностных десублиматоров**

Поверхностные десублиматоры, обеспечивающие десублимацию вещества на охлаждаемой поверхности, могут работать как в периодическом, так и в непрерывном режиме.

Десублиматоры сдвигающейся насадкой, псевдоожиженным слоем и непрерывным удалением десублимата со стенок аппарата относятся к аппаратам непрерывного действия. Большинство десублиматоров поверхностного типа относятся к аппаратам непрерывного действия. При попеременном включении-отключении теплоносителя в аппарате осуществляются циклы десублимации и сублимации – удаления слоя десублимата.

Применяют также регенераторы. В них парогазовую смесь подают в цикле намораживания, затем переключают потоки и в аппарат вводят газ более низкого давления; выделенный в предыдущем цикле слой десублимата удаляется сублимацией [6, 7].

В настоящее время отсутствуют типовые конструкции десублиматоров, что приводит к большому разнообразию аппаратурно-технологического оформления процесса десублимации.



Классификация основных типов поверхностных десублиматоров представлена на рисунке 1.2.



Рисунок 1.2 – Классификация поверхностных десублиматоров

Широкое распространение получили десублиматоры ящичного типа, представляющие собой круглые или овальные полые ящики из листовой стали. Десублимация в них происходит в результате передачи тепла через стенки от движущейся через аппарат парогазовой смеси. Для лучшего охлаждения устанавливают ряд аппаратов, причем первые по ходу ПГС аппараты снабжаются рубашками, через которые циркулирует хладагент. Десублимат образуется на стенках аппарата и в его объеме. Для улавливания последнего используют циклоны или скрубберы [1, 29].

Для съема продукта со стенок, аппараты периодически обстукиваются деревянными молотками или специальными вибраторами. Возможна также

очистка вращающимися обметателями. Кристаллы десублимата выгружаются через нижние люки аппаратов.

#### **1.1.4 Сублимационно-десублимационные аппараты для ядерно-опасных веществ**

В развитии атомной промышленности является актуальным вопрос удешевления производства и расширения сырьевой базы. Решением этой проблемы считается переработка уже использованного оружейного урана в ядерное топливо для реакторов. Основной является технология выделения  $UF_6$  из парогазовой смеси путем его десублимации [17].

Важным требованием к оборудованию является соблюдение правил ядерной безопасности. Поэтому десублиматоры, предназначенные для десублимации  $UF_6$ , могут иметь геометрическую форму трубы с определенным внутренним диаметром.

### **1.2 Физическая и математическая модели процесса десублимации**

Десублимация  $UF_6$  и других летучих фторидов металлов из газового потока в присутствии неконденсирующихся газов (кислород, фтор, азот и др.) является многостадийным процессом.

Например, для десублимации  $UF_6$  основными стадиями являются:

1) массоперенос молекул  $UF_6$  из ядра газового потока к поверхности конденсации;

2) фазовый переход у охлаждаемой поверхности:  $UF_6_{газ} \rightarrow UF_6_{тв}$ .

Последняя стадия процесса, в свою очередь, включает следующие последовательные ступени: адсорбцию молекул  $UF_6$  на поверхности десублимации, поверхностную диффузию адсорбированных молекул, гетерогенное зародышеобразование, рост числа и размеров зародышей и

увеличение кристаллического слоя на поверхности десублиматора. Любая из этих ступеней может стать лимитирующей.

Если процесс лимитируется стадией массопереноса, то скорость десублимации можно описать с помощью уравнения стефановского потока для одномерной диффузии [8]. Для случая десублимации веществ из разбавленных потоков газовой смеси это уравнение имеет вид:

$$j = \frac{D}{\delta} \frac{P}{RT} \ln \frac{P-p_0}{P-p} = \beta \frac{P}{RT} \ln \frac{P-p_0}{P-p}, \quad (1.2.1)$$

где  $j$  – диффузионный поток или скорость десублимации вещества, моль/(м<sup>2</sup>·с);

$D$  – коэффициент диффузии вещества в газовом потоке, м<sup>2</sup>/с, равный

$$D = \frac{\beta d}{Nu}, \quad (1.2.2)$$

где  $\beta$  – коэффициент массопередачи, м/с;

$d$  – линейный размер, м;

$Nu$  – критерий Нуссельта для процесса диффузии;

$\delta$  – толщина диффузной пленки у поверхности, м;

$P$  – общее давление газовой смеси, Па;

$p$  – парциальное давление вещества в ядре газового потока, Па;

$p_0$  – давление насыщенного пара вещества над поверхностью десублимации, Па;

$R$  – газовая постоянная, равная 8,314 Дж/(моль К);

$T$  – температура газового потока, К.

Из формулы Стефана (2.1) для модели трубчатого десублиматора можно получить [7, 33]:

$$\ln \frac{P-p_0}{P-p_l} = \beta \frac{4l}{d} \tau, \quad (1.2.3)$$

где  $l$  и  $d$  – длина и диаметр поверхности десублиматора, м;

$\tau$  – время контакта газа с поверхностью, с;

$p_1$  и  $p_2$  – парциальное давление  $\text{UF}_6$  в начале и в конце трубы, Па.

Левая часть формулы (1.2.3) является числом единиц переноса. Длина канала, необходимая для достижения заданной степени десублимации, прямо пропорциональна этой безразмерной величине. В противоточных процессах перегонки и адсорбции число единиц переноса связывают числом теоретических ступеней.

Из уравнений (1.2.1)-(1.2.3) видно, что одним из основных факторов, определяющих скорость десублимации, является коэффициент массопередачи, который возрастает с увеличением турбулизации потока в десублиматоре. Если скорость процесса десублимации определяется стадией фазового перехода, то, как показано в работе [9], процесс можно описать либо уравнением сокращающейся сферы:

$$1-(1-\alpha)^{1/3}=k\tau, \quad (1.2.4)$$

либо обобщенным топохимическим уравнением (уравнением Ерофеева) первой степени:

$$1-\alpha=1^{-k\tau}, \quad (1.2.5)$$

где  $k$  – константа скорости процесса десублимации,  $\text{с}^{-1}$   $\alpha=(P_1-P_2)/P_1$  – коэффициент десублимации [1, 9, 10].

Величина коэффициента десублимации может колебаться в пределах от 0 до 1,0 в зависимости от природы вещества, степени его загрязнения примесями, наличия молекул инертного газа и других факторов [1,10].

Константу скорости  $k$  в уравнениях (1.2.4) и (1.2.5), а также коэффициент массопередачи  $\beta$  в уравнениях (1.2.1) и (1.2.2) теоретическим путем рассчитать невозможно. Приведенные уравнения дают лишь общие представления о закономерностях процесса десублимации веществ и о факторах, воздействуя на которые можно повысить эффективность процесса. Применительно к каждой конструкции аппарата значение этих коэффициентов можно определить экспериментальным путем, а затем, установив лимитирующую стадию процесса, составить математическую модель

процессов, протекающих в аппарате, которую в дальнейшем можно использовать в проектных и технологически-эксплуатационных целях с целью оптимизации (или масштабирования) их значений [31].

### 1.3 Пересыщение пара

При охлаждении парогазовых смесей в зависимости от технологических условий одновременно с гетерогенной десублимацией на поверхности, может происходить гомогенная десублимация в объеме газа с образованием частиц аэрозоля. Известно [10], что процесс десублимации протекает с заметной скоростью, если степень пересыщения газа  $S$  превышает величину, равную 1, то есть

$$S > 1 \quad (1.3.1)$$

Избыточная поверхностная энергия компенсируется предварительным пересыщением (избытком энергии Гиббса) для образования гетерогенной дисперсной фазы из гомогенной [11, 12].

Так как десублимация на поверхности может происходить только при выполнении условия

$$S \leq S_{\text{кр}} \quad (1.3.2)$$

где  $S_{\text{кр}}$  – критическая степень пересыщения (при которой начинается процесс десублимации в объеме).

При достижении на поверхности аппарата критической степени пересыщения, весь десублимат образуется на этой поверхности. Чем ниже температура хладагента, тем выше скорость десублимации.

Это объясняется потерями продукта из-за объемной десублимации, возникающей в тех частях аппарата, где достигается критическая степень пересыщения.

На основании экспериментальных исследований процессов сублимации и десублимации различных фторидов металлов [3, 4, 16] установлено, что наиболее вероятной причиной уменьшения выхода фторидов в десублимат

является необоснованно выбранная низкая температура десублиматора, приводящая к объемной десублимации продуктов и образованию аэрозолей. Поэтому при проведении процесса десублимации  $UF_6$  необходимо выбрать такие условия, при которых исключались бы возможности его объемной десублимации [12, 17].

Если десублимация происходит на поверхности десублиматора, то слой десублимата будет твердым и гладким, если же в объеме, то образующиеся твердые аэрозольные частицы, по мере их осаждения на какие-либо холодные поверхности, будут давать рыхлый, подобный инею, слой десублимата. В зависимости от степени пересыщения размеры аэрозолей могут колебаться от 0,08 мкм до 4,0 мкм [10].

Выделение аэрозолей из парогазовой смеси фильтрацией, центрифугированием и рядом других способов трудоемко и малоэффективно. Поэтому необходимо таким образом организовать процесс, чтобы исключить объемную десублимацию продукта. В связи с этим задача сводится к определению минимально допустимой температуры десублиматора, при которой исключается достижение критической степени пересыщения парогазовой смеси в объеме.

#### 1.4 Расчет температуры десублимации

Если обозначить температуру парогазовой смеси на входе в десублиматор через  $T_1$ , холодной поверхности –  $T_2$ , расстояние, которое пройдет парогазовая смесь, охладившись от температуры  $T_1$  до  $T_2$ , –  $l$ , то, допуская, что по мере увеличения расстояния  $x$  от точки входа газа в аппарат до точки выхода из него температура парогазовой смеси  $T$  будет линейно уменьшаться от  $T_1$  до  $T_2$ , получим:

$$T = T_2 + \frac{T_1 - T_2}{l}x, \quad (1.4.1)$$

Тогда и давление  $P$  будет меняться аналогичным образом:

$$P = P_2 + \frac{P_1 - P_2}{l} x, \quad (1.4.2)$$

Степень пересыщения пара  $S$  можно рассчитать следующим образом:

$$S = \frac{P_T}{P_{\infty(T)}} x, \quad (1.4.3)$$

Величина  $P_{\infty(T)}$  связана с температурой процесса десублимации соотношением [1, 10, 19]:

$$\ln P_{\infty(T)} = A - \frac{B}{T}, \quad (1.4.4)$$

где  $A$  и  $B$  – постоянные коэффициенты.

Подставляя значения давления и температуры, полученные из выражений (1.4.1), (1.4.2), в выражение (1.4.3), можно определить значение степени пересыщения при заданной температуре

$$S = \frac{T - T_2}{T_1 - T_2} \cdot \frac{P_1 - P_2}{P_{\infty(T)}} + \frac{P_2}{P_{\infty(T)}}, \quad (1.4.5)$$

На рисунке 1.3 приведена схема образования пересыщенного пара при движении турбулентного потока смеси в охлаждаемой снаружи трубе [10, 18].

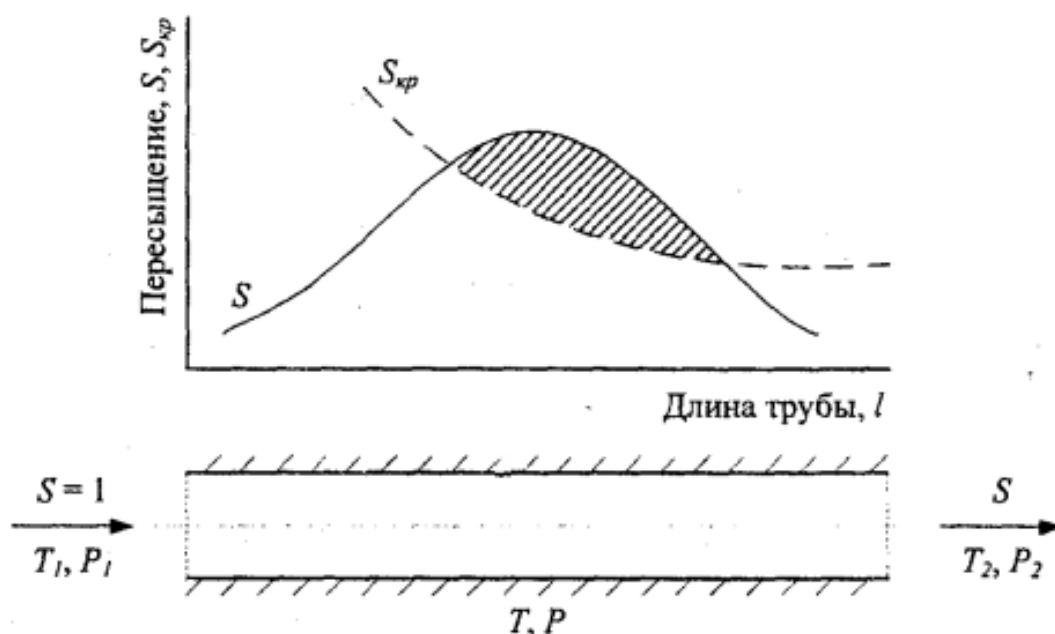


Рисунок 1.3 – Изменение пересыщения потока пара при движении по трубе

Существенную роль в процессах десублимации  $UF_6$  играет теплообмен между газом и охлаждаемой поверхностью. Температура хладагента как правило остается постоянной и по мере роста слоя десублимата, обладающего высоким термическим сопротивлением, температура поверхности десублимации увеличивается, а степень десублимации монотонно снижается.

В условиях производства, выравнивание температур и давлений в десублиматорах происходит за счет молекулярной диффузии и теплопроводности продуктов. Одновременно происходит охлаждение газа и перенос молекул пара к поверхности десублимации.

Скорости массообмена и теплообмена достигают таких значений, что пересыщение пара сначала увеличивается до максимального значения, а затем уменьшается. Объемная десублимация протекает в тот момент, когда соотношение скоростей массо- и теплообмена превышает критическое значение (заштрихованная часть на рисунке 1.3).

Поэтому десублимация  $UF_6$  осуществляется на движущейся поверхности в нестационарных условиях. Для стабилизации процесса теплосъема от парогазовой смеси и, собственно, десублимации используют различные способы очистки поверхности от десублимата (скребковые механизмы, тепловой сброс осадка и т.д.) [37, 40].

Если массообмен преобладает над теплообменом, то  $UF_6$  успевает продиффундировать в осадок до того, как газовая смесь охладится. Тогда пересыщение не достигает критического значения и объемной десублимации продукта из парогазовой смеси не будет. Если же преобладает стадия теплообмена, то десублимат не успеет продиффундировать к поверхности десублимации, и преобладающим процессом будет объемная десублимация. Для тяжелых молекул  $UF_6$  вероятность второй модели десублимации значительно выше.



## 1.5 Расчет критической степени пересыщения

Критическое пересыщение  $S_{Kp}$  при гомогенной десублимации достигает такого значения, при котором скорость образования зародышей, способных к дальнейшему росту, в единице объема равна единице. Однако зародыши образуются и при  $I < 1$ .

С учетом этого [1, 10, 13] можно рассчитать значение критического пересыщения пара при его гомогенной конденсации, принимая  $I=1$  и  $S=S_{Kp}$

$$\lg S_{Kp} = \sqrt{\frac{1,44 M}{\lg K \rho}} \left(\frac{\sigma}{T}\right)^{3/2}, \quad (1.5.1)$$

где  $K$  – кинетический множитель, равный

$$K = \frac{\alpha}{\rho} \left(\frac{2m\sigma}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{P}{kT}\right)^2, \quad (1.5.2)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана, равная  $1,38 \cdot 10^{-16}$  эрг/К;

$T$  – температура смеси, К;

$\alpha$  – коэффициент десублимации, доли;

$\rho$  – плотность десублимирующегося вещества, г/см<sup>3</sup>;

$m$  – масса молекулы пара десублимирующегося вещества, г;

$\sigma$  – поверхностное натяжение, дин/см [14]:

$$\sigma = \frac{\Delta H - RT}{V^0} \cdot \frac{\Delta n}{n} h, \quad (1.5.3)$$

где  $P$  – давление парогазовой смеси, мм рт. ст.;

$M$  – молекулярная масса десублимата, г/моль,

$\Delta$  – изменение энтальпии при испарении, кДж/моль;

$R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);

$n$  – координационное число;

$\Delta n$  – число недостающих соседей в поверхностном слое;

$h$  – толщина монослоя молекулы (для фторидов равна 0,2...0,3 нм), м;

$V^0$  – мольный объем твердого вещества, см<sup>3</sup>/моль:

$$V^0 = \frac{M}{\rho}, \quad (1.5.4)$$

Уравнение (1.5.1) показывает, что величина  $S_{Kr}$  зависит от свойств конденсированной фазы и с ростом температуры она снижается.

Уравнение (1.5.1) описывает процесс объемной десублимации в отсутствии гетерогенной фазы. В производственных процессах, в том числе в процессе фторирования оксидов урана, газовый поток даже после фильтрации может содержать определенное, довольно значительное, количество твердых частиц, являющихся ядрами объемной десублимации. Вследствие радиоактивности этих аэрозольных частиц и газовой фазы в таком потоке содержится много газовых ионов, и эти факторы снижают величину критического пересыщения. Так, объемная десублимация  $UF_6$  может наступить уже при столь малых величинах пересыщения, как 1,001.

## 1.6 Кинетика роста частиц

Кинетика роста твердых частиц десублимата является важной характеристикой процесса десублимации.

От скорости зародышеобразования и роста частиц зависит выход и размеры твердой фазы. Возрастание пересыщения приводит увеличению числа новых зародышей и их поверхности, за счет этого концентрация парогазовой смеси уменьшается.

Частицы критического размера в каждый момент времени имеют нулевые скорости роста. Критический радиус со временем увеличивается, что объясняется уменьшением пересыщения парогазовой смеси. Существует энергетический барьер, препятствующий росту частиц с размером, меньше критического.

Величина степени пересыщения связана с радиусом образующихся при этом зародышей соотношением [1,10,13]:

$$\ln S = \frac{2\sigma m}{RT\rho r}, \quad (1.6.1)$$

где  $M$  – молекулярная масса вещества, г/моль;

$r$  – радиус критического зародыша, см.

Пересыщению отвечает определенный критический размер частицы.

Радиус критического сферического зародыша определяется из уравнения Томсона:

$$r_{кр} = \frac{2\sigma m}{\rho RT \ln S}, \quad (1.6.2)$$

При достижении зародышами критического размера происходит их стабилизация, и они становятся центрами кристаллизации [15].

Массовую концентрацию тумана в единице объема можно рассчитать по уравнению [10]:

$$G = \frac{MP_{\infty(T)}}{RT} (S-1), \quad (1.6.3)$$

где  $G$  – массовая концентрация тумана, г/см<sup>3</sup>;

$R$  – газовая постоянная, равная  $6,24 \cdot 10^{-4}$  см<sup>3</sup> мм рт. ст./ (моль-град).

## 1.7 Скорость образования зародышей

Работа на образование зародыша равна сумме работ переноса частиц из газообразной фазы в жидкую или твердую и образования поверхности зародыша. Для комплекса в неустойчивом равновесии с пересыщенным паром суммарная работа образования определяется [1,10]:

$$\Delta G = 1/3 \sigma F, \quad (1.7.1)$$

где  $F$  – поверхность образующейся фазы.

Для шарообразной капли

$$F = 4\pi r^2, \quad (1.7.2)$$

поэтому, подставив значение  $F$  в выражение (2.20), получим:

$$\Delta G = 4/3 \pi r^2 \sigma, \quad (1.7.3)$$

Подставив значение  $r$  из уравнения (2.18) в уравнение (2.22), найдем:

$$\Delta G = \frac{16\pi m^2 \sigma^3}{3\rho^2 k^2 T^2 (\ln S)^2}, \quad (1.7.4)$$

Вероятность возникновения зародышей новой фазы в единице объема в единицу времени равна

$$I = K e^{\frac{\Delta G}{kT}}, \quad (1.7.5)$$

где  $I$  – скорость образования зародышей,  $\text{см}^{-3} \cdot \text{с}^{-3}$ :

$$I = \frac{dN}{d\tau}, \quad (1.7.6)$$

где  $N$  – концентрация капель,  $\text{см}^{-3}$ ;  $\tau$  – время, с.

Подставив значения  $K$  и  $\Delta G$  из уравнений (1.5.2) и (1.7.1) в (1.7.5), получим:

$$I = \frac{\alpha}{\rho} \left( \frac{2m\sigma}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{P}{kT} \right)^2 \exp \left[ - \frac{16\pi}{3(\ln S)^2} \left( \frac{m}{\rho} \right)^2 \left( \frac{\sigma}{kT} \right)^3 \right], \quad (1.7.7)$$

Уравнение (1.7.5) характеризует скорость образования зародышей в пересыщенном паре без учета взаимного влияния растущих капель. Для гексафторида урана, проявляющего свойства идеального газа, уточнения уравнения (1.7.5) не требуется [6, 35].

## 1.8 Критерий, определяющий характер процесса десублимации

Отношение скоростей массо- и теплообмена при десублимации определяет, где она будет происходить, на поверхности аппарата или в объеме парогазовой смеси. Оценить его можно по критерию Льюиса [20]:

$$Le = \frac{\alpha}{c_p \rho \beta}, \quad (1.8.1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,  $\text{кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{К})$ ;

$c_p$  – удельная теплоемкость парогазовой смеси,  $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;

$\beta$  – коэффициент массопередачи,  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{мм рт. ст.})$ .

При  $Le > 1$  интенсивность теплообмена будет выше. Продукт десублимации в виде пара не успевает доходить к поверхности десублиматора и основным процессом становится объемная десублимация.

В виду сложности определения коэффициентов массо- и теплоотдачи для различных условий организации данного процесса расчет значения критерия Льюиса практически не применим для оценки эффективности процесса.

Изложенный анализ процесса десублимации  $UF_6$  позволяет выявить те группы параметров, которые определяют, в конечном счете, его эффективность, понять механизм процесса.

Однако эти зависимости, как и в большинстве тепло- и массообменных процессов, для практических расчетов конструкции десублиматора и параметров его работы не всегда применимы из-за сложности определения коэффициентов тепло- и массопередачи в условиях постоянных флуктуаций характеристик теплообменной поверхности, состава и расхода исходной газовой смеси.

Поэтому для определения оптимальных технологических характеристик и параметров работы десублиматоров требуется их экспериментальная проверка как на стадии конструирования отдельных элементов аппаратов, так и конструкций в целом, привлекая на помощь математическое моделирование [38].

## 2 Описание математической модели

Скорость нестационарного процесса десублимации зависит от подвода газообразного  $\text{UF}_6$  к поверхности теплообмена и интенсивности теплообмена через стенку емкости с хладагентом. Внутреннее оребрение емкости увеличивает площадь теплообменной поверхности, как следствие увеличивает производительность емкости [21].

Сотрудниками Отделения ядерно-топливного цикла ИЯТШ ТПУ разработана двухмерная математическая модель нестационарного процесса десублимации  $\text{UF}_6$  в вертикальные погружные емкости с горизонтальным оребрением. Описание этой модели представлено ниже.

### 2.1 Допущения двухмерной модели

В ходе создания математической модели десублимации гексафторида урана сделан ряд допущений [22, 23]:

1. Десублимация  $\text{UF}_6$  происходит на боковой и нижней поверхностях емкости. Ее верхняя часть в теплообмене не участвует.
2. Температура внешних поверхностей емкости постоянна и равна температуре хладагента. Для верхней части емкости она равна температуре воздуха.
3. Процесс десублимации  $\text{UF}_6$  определяется теплоотводом через стенку емкости и слой десублимата. Все тепло, выделяющееся при фазовом переходе, отводится хладагентом.
4. Температура фазового перехода  $\text{UF}_6$  равна равновесной температуре и определяется по давлению газообразного  $\text{UF}_6$  над слоем десублимата.
5. Изменение теплоты десублимации намного больше, чем изменение энтальпии газообразного  $\text{UF}_6$  при его охлаждении.

6. Выполняется гипотеза локального термодинамического равновесия в пределах каждой из фаз.

7. Объемная десублимация отсутствует, а поверхностная происходит только на боковой и нижней внутренних поверхностях емкости.

8. Химических реакций при десублимации нет [26].

## 2.2 Объект исследования

Объектом исследования являлись вертикальная погружная емкость с горизонтальным оребрением (рисунок 2.1а) объемом 0,06 м<sup>3</sup>. Количество ребер – 13. Расчетную область для данной емкости представляли в виде объекта, который разбит на несколько подобластей (рисунок 2.1б).

Подобласть I соответствует верхней части емкости, подобласть II – объему емкости с горизонтальным оребрением, подобласть III – нижней части емкости. Объект представляли как совокупность подобластей, рассматриваемых в двухмерной постановке с общими граничными условиями в местах стыка. В каждой подобласти находили совместное решение уравнений тепло- и массообмена с учетом соседних подобластей [24, 34].

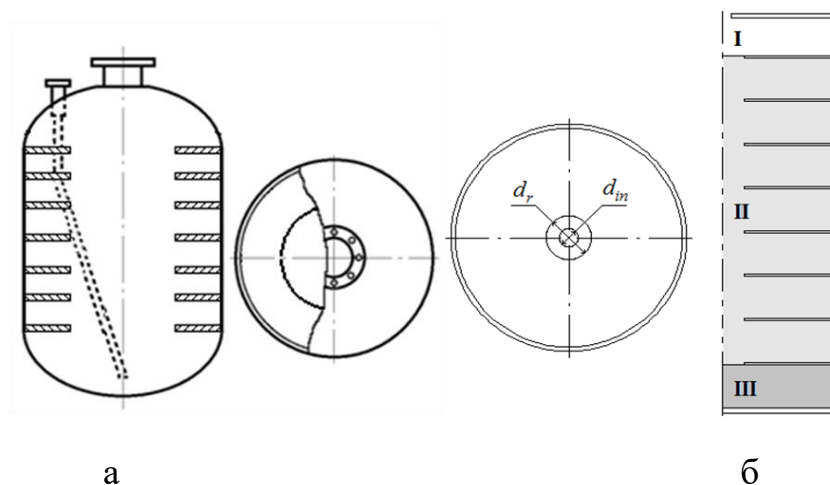


Рисунок 2.1а) – вертикальная погружная емкость с горизонтальным оребрением, 2.1б) – схема разбиения расчетной области на подобласти,

$d_{in}$  – диаметр входного патрубка емкости,  $d_r$  – диаметр центрального отверстия ребра

## 2.3 Уравнения газовой динамики

Течение газообразного  $\text{UF}_6$  в емкости является ламинарным, вязким, не сжимаемым, существенно дозвуковым и может характеризоваться изменением температуры, а, следовательно, и плотности. Для описания такого течения использовалась система уравнений газовой динамики, которая в векторной форме выглядит следующим образом:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r} \cdot \rho V = 0, \quad (2.2.1)$$

$$\rho \frac{\partial V}{\partial t} + \rho \left( V \cdot \frac{\partial}{\partial r} \right) V = - \frac{\partial \rho}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial r} \cdot \mu \left( \frac{\partial V}{\partial r} \right) + \rho g, \quad (2.2.2)$$

$$p = \rho T \frac{R}{m}, \quad (2.2.3)$$

В цилиндрической системе координат система уравнений (2.2.1)-(2.2.3) записывается в виде:

$$\frac{\partial r \rho}{\partial t} + \frac{\partial r \rho u}{\partial r} + \frac{\partial r \rho v}{\partial z} = 0, \quad (2.2.4)$$

$$\frac{\partial r \rho u}{\partial t} + \frac{\partial r \rho u^2}{\partial r} + \frac{\partial r \rho v u}{\partial z} = - \frac{\partial r P}{\partial r} + \mu \left( \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( r \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right), \quad (2.2.5)$$

$$\frac{\partial r \rho v}{\partial t} + \frac{\partial r \rho u v}{\partial r} + \frac{\partial r \rho v^2}{\partial z} = - \frac{\partial r P}{\partial r} + \mu \left( \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( r \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right) + r \rho g, \quad (2.2.6)$$

$$\frac{\partial r c \rho T}{\partial t} + \frac{\partial r \rho u T}{\partial r} + \frac{\partial r \rho v T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda r \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (2.2.7)$$

Для замыкания системы уравнений и определения плотности газовой смеси использовалось уравнение Клапейрона для смеси в виде:

$$\rho = \frac{M_{uf} P}{TR} \quad (2.2.8)$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $T$  – температура;  $M_{uf}$  – молекулярная масса  $\text{UF}_6$ .

На границе задавалась температура торможения и давление, условия симметрии на оси емкости, скорость движения фронта фазового перехода на боковой и нижней внутренних поверхностях емкости вычислялась путем решения задачи Стефана. Для решения системы уравнений (2.2.4)-(2.2.7) использовался алгоритм SIMPLE [24, 26-30, 39].



Считали, что температура внешней поверхности емкости и температура хладагента равны, также как и температура границы раздела фаз и равновесная температура фазового перехода (граничные условия первого рода) [32].

На поверхности раздела двух фаз выполняется условие Стефана:

$$v_w(\tau)\rho_u L = \lambda \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_1 - \lambda \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_2, \quad (2.2.9)$$

где  $v_w(\tau)$  – скорость фазового перехода  $UF_6$ ;  $\rho_u$  – плотность десублимированного  $UF_6$ ;  $L$  – теплота фазового перехода  $UF_6$ ;  $\lambda$  – плотность газообразного  $UF_6$ .

## 2.4 Уравнения теплообмена

Для определения температурного поля в твердой фазе и, соответственно, величины теплового потока от газообразного  $UF_6$  к хладагенту использовалось стандартное уравнение теплопроводности:

$$\frac{\partial r \, c \rho T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda_{UF} \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad (2.3.1)$$

После вычисления тепловых потоков на внутренней и внешней поверхности стенок определялась масса перешедшего в твердое состояние  $UF_6$  и, соответственно, скорость движения поверхности раздела фаз.

При решении уравнений (2.3.4)-(2.3.7) определялось распределение скоростей движения газовой смеси и давления в объеме емкости, занятом газовой фазой. Температура фазового перехода  $UF_6$  определялась методом биссекций по известной зависимости давления насыщенных паров  $UF_6$  от температуры над поверхностью фазового перехода  $UF_6$  [32].

Разработанная математическая модель программно реализована на языке FORTRAN-90 в среде Microsoft Developer Visual Studio [24].

Проверка данной модели и программы расчета показала, что она адекватно описывает процессы тепло- и массообмена.

### **3 Практическая часть**

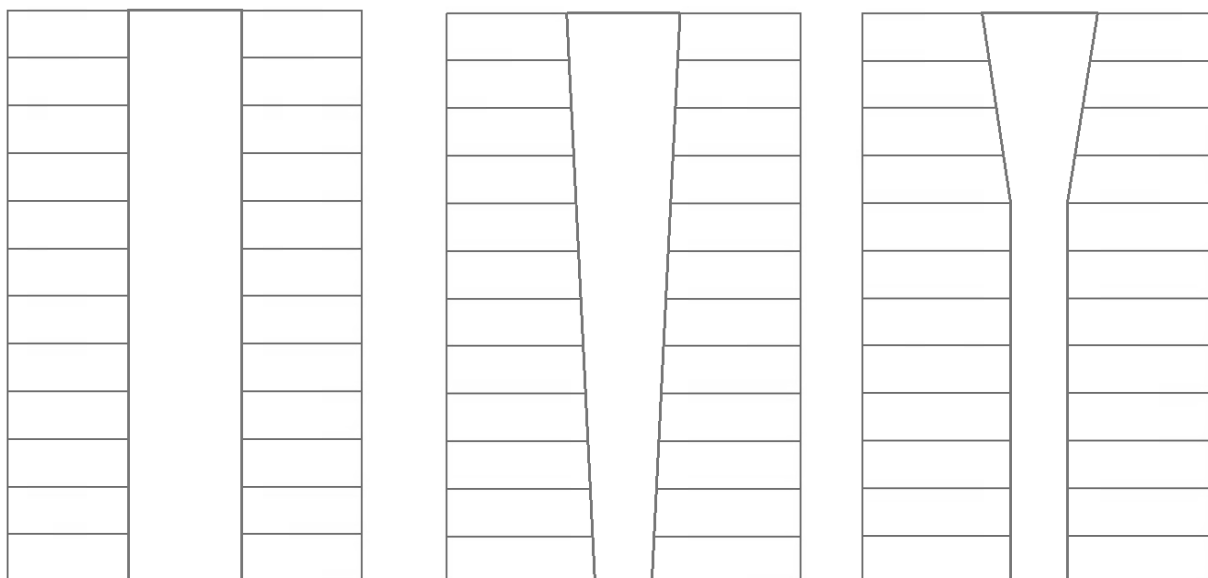
#### **3.1 Расчет динамики заполнения емкости объемом 0,06 м<sup>3</sup> с горизонтальным оребрением**

В соответствии с поставленной целью необходимо было определить оптимальную конфигурацию центральных отверстий в горизонтальных ребрах емкости объемом 0,06 м<sup>3</sup>, которая бы обеспечивала максимальное значение ее средней производительности.

Кроме того, функционал разрабатываемого программного обеспечения был расширен за счет предоставления пользователю возможности через интерфейс задавать диаметр центрального отверстия каждого ребра индивидуально и учитывать «перемерзание» на любом из ребер емкости.

Рассмотрено пять вариантов конфигурации этих отверстий:

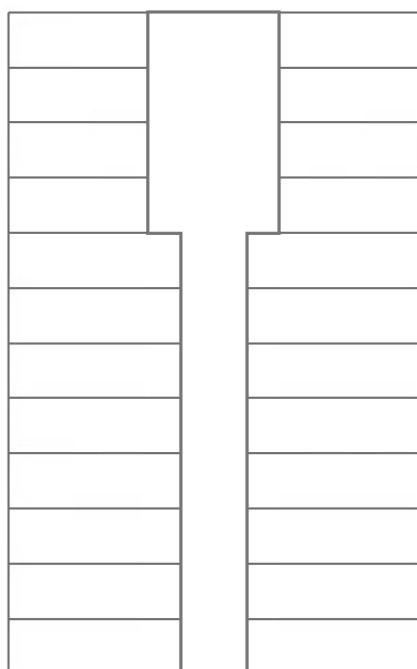
1. все ребра имеют одинаковый диаметр центрального отверстия (цилиндр, рисунок 3.1а);
2. диаметр центральных отверстий ребер линейно уменьшается от верхнего 1-го ребра к нижнему 13-му ребру, получается форма центральных отверстий в виде усеченного конуса (рисунок 3.1б);
3. диаметр центрального отверстия первого ребра не изменяется, а диаметр центральных отверстий последующих ребер уменьшался с шагом в  $1,0 \cdot 10^{-3}$  м до момента их «перемерзания», образуя в верхней части емкости усеченный конус, а в нижней части емкости – цилиндр (рисунок 3.1в);
4. центральные отверстия в верхних ребрах имеют больший диаметр, а в нижних меньший (два цилиндра, рисунок 3.1г);
5. центральные отверстия в ребрах выполнены в виде 3-х цилиндров различного диаметра (рисунок 3.1д).



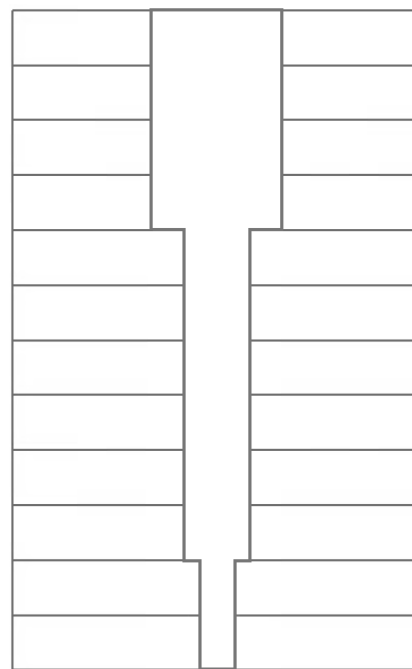
а)

б)

в)



г)



д)

Рисунок 3.1 – Конфигурация центрального отверстия в ребрах емкости: а) цилиндр, б) усеченный конус, в) усеченный конус и цилиндр, г) два цилиндра разного диаметра, д) три цилиндра разного диаметра

### 3.1.1 Расчет конфигурации центральных отверстий ребер в виде цилиндра

С использованием двухмерной математической модели процесса десублимации  $UF_6$  проведен расчет зависимости средней производительности и степени заполнения емкости объемом  $0,06 \text{ м}^3$  от диаметра и конфигурации центрального отверстия в горизонтальных ребрах. Диаметр центрального отверстия ребер изменяли от  $1,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}$  до  $8,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}$  с шагом  $5,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ . Во время расчета диаметр центрального отверстия во всех ребрах был одинаковым.

Для проведения расчета в программе задавались геометрические характеристики емкости, которые представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Геометрические характеристики емкости

Параметр	Значение
Объем емкости, $\text{м}^3$	0,06
Количество ребер, шт.	13
Внешний диаметр емкости, м	0,312
Толщина стенки емкости, м	0,006
Высота емкости, м	0,848
Диаметр входного клапана, м	0,025
Толщина ребра, м	0,002
Расстояние между ребрами, м	0,04
Расстояние от дна емкости до нижнего ребра, м	0,176
Диаметр, входного клапана, $d_k$ , м	$25 \cdot 10^{-3}$

Условия, при которых проводился расчет, приведены в таблице 3.2

Таблица 3.2 – Условия проведения расчета

Параметр	Значение
Начальное давление в емкости	533,3 Па (4 мм рт. ст.)
Давление в коллекторе	10665,8 Па (80 мм рт. ст.)
Температура хладагента, °С	минус 25
Температура в коллекторе, °С	30
Степень заполнения емкости, % от ее свободного объема	70

Полученные результаты расчета приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Результаты расчета параметров десублимации UF<sub>6</sub> при разных диаметрах центральных отверстий в ребрах

Диаметр центрального отверстия ребер, $d$ , м	Время десублимации, $t$ , час	Масса десублими- рованного UF <sub>6</sub> , $m$ , кг	Средняя производительность емкости, $q$ , г/с	Степень заполнения емкости, $V$ , %
$1,0 \cdot 10^{-2}$	1,772	10,37	1,625	3,4
$1,5 \cdot 10^{-2}$	2,880	21,35	2,059	7,0
$2,0 \cdot 10^{-2}$	4,306	39,08	2,521	12,8
$2,5 \cdot 10^{-2}$	6,016	65,21	3,011	19,7
$3,0 \cdot 10^{-2}$	8,000	94,98	3,299	31,1
$3,5 \cdot 10^{-2}$	10,372	123,12	3,298	40,3
$4,0 \cdot 10^{-2}$	13,039	149,72	3,190	49,0
$4,5 \cdot 10^{-2}$	16,033	174,82	3,029	57,3
$5,0 \cdot 10^{-2}$	19,366	198,49	2,847	65,0
$5,5 \cdot 10^{-2}$	16,447	213,84	3,612	70,0
$6,0 \cdot 10^{-2}$	12,716	213,84	4,671	70,0
$6,5 \cdot 10^{-2}$	12,369	213,84	4,802	70,0

Продолжение Таблицы 3.3 – Результаты расчета параметров десублимации  $\text{UF}_6$  при разных диаметрах центральных отверстий в ребрах

Диаметр центрального отверстия ребер, $d$ , м	Время десублимации, $t$ , час	Масса десублими- рованного $\text{UF}_6$ $m$ , кг	Средняя производительность емкости, $q$ , г/с	Степень заполнения емкости, $V$ , %
$7,0 \cdot 10^{-2}$	12,405	213,84	4,788	70,0
$7,5 \cdot 10^{-2}$	12,461	213,84	4,767	70,0
$8,0 \cdot 10^{-2}$	12,526	213,84	4,742	70,0

По данным таблицы 3.3 построены зависимости средней производительности и степени заполнения емкости от диаметра центрального отверстия (рисунок 3.2).

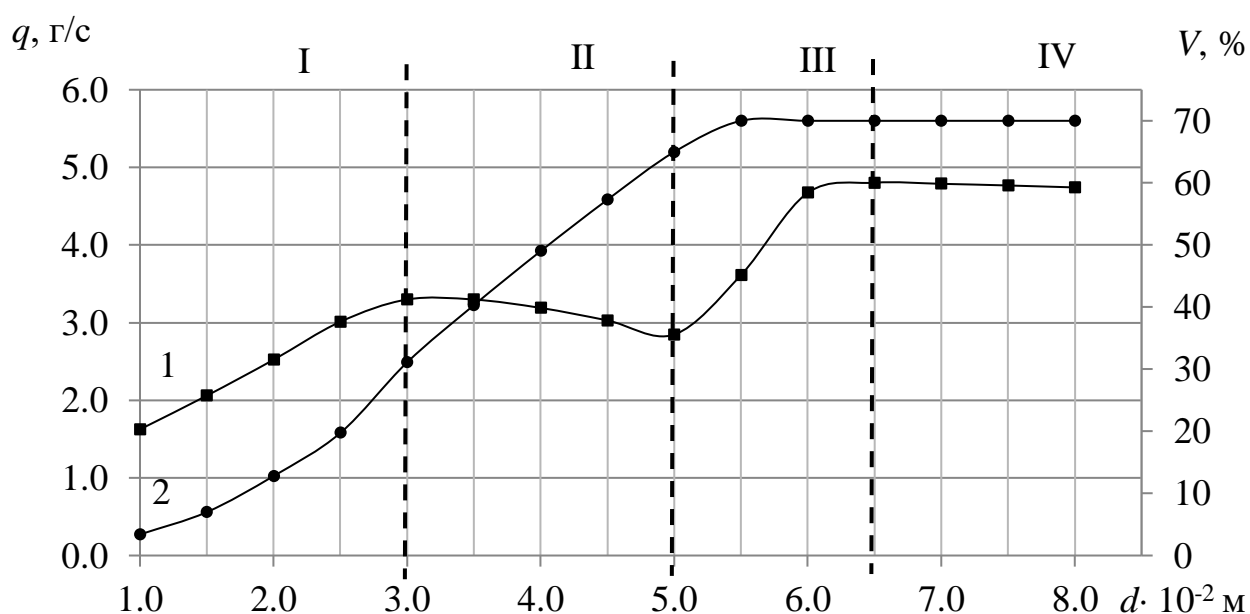


Рисунок 3.2 – Зависимости средней производительности ( $q$ , кривая 1) и степени заполнения ( $V$ , кривая 2) емкости от диаметра центрального отверстия ребер

Расчетная кривая  $q(d)$  на рисунке 3.2 имеет несколько перегибов. Для удобства она была разделена на 4 участка.

На первом участке наблюдается практически линейный рост средней производительности до 3,299 г/с при увеличении диаметра центрального отверстия ребер до  $3,0 \cdot 10^{-2}$  м. При этом степень заполнения емкости увеличивается с 3,4 до 31,1 % ее свободного объема. Центральное отверстие верхнего ребра емкости «перемерзает» (рисунок 3.3), из-за этого емкость не заполняется до нужной степени (70%).

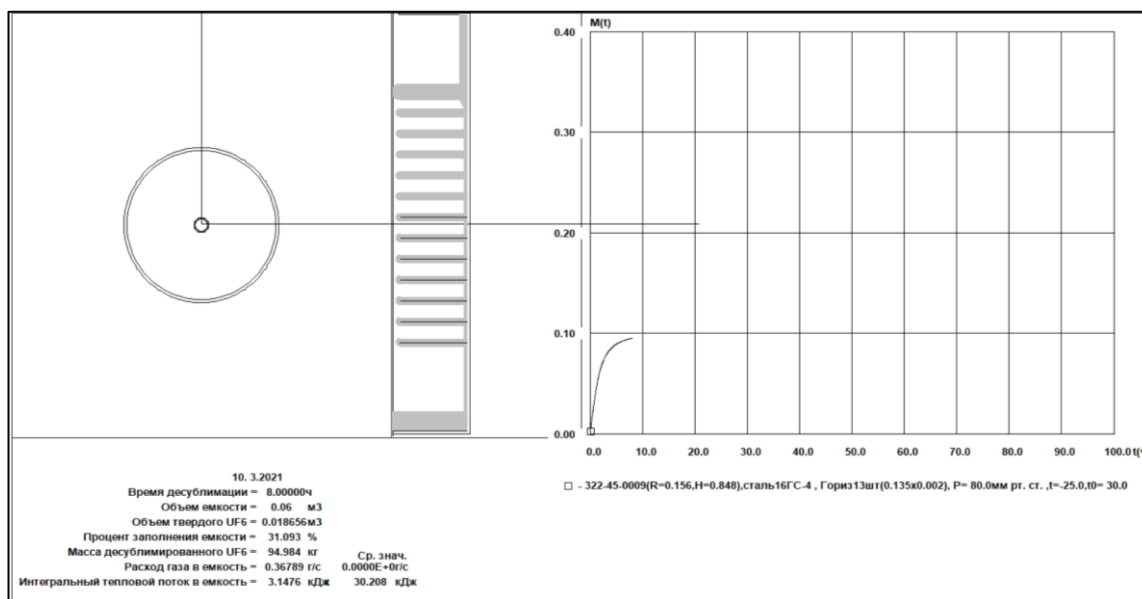


Рисунок 3.3 – Скриншот результатов расчета десублимации UF<sub>6</sub> на первом участке кривой 1

Увеличение диаметра центрального отверстия ребер позволяет газообразному UF<sub>6</sub> быстрее поступать в нижнюю часть емкости. При этом увеличивается теплообменная поверхность рабочей части емкости, средняя производительность и степень ее заполнения десублимированным UF<sub>6</sub>.

На втором участке кривой происходит нелинейное снижение средней производительности емкости до 2,845 г/с при дальнейшем увеличении диаметра центрального отверстия ребер до  $5,0 \cdot 10^{-2}$  м. При этом степень заполнения емкости увеличивается с 31,1 до 65,0 % ее свободного объема. Это вызвано тем, что диаметр центрального отверстия в ребрах становится больше диаметра входного отверстия и газообразный UF<sub>6</sub> более свободно поступает в нижнюю часть емкости. При этом увеличиваются поверхность теплообмена, с

которой контактирует газообразный  $UF_6$ , степень заполнения и время заполнения емкости. Поскольку скорость десублимации  $UF_6$  со временем нелинейно уменьшается, то происходит уменьшение средней производительности емкости.

На третьем участке при дальнейшем увеличении диаметра центрального отверстия в ребрах до  $6,5 \cdot 10^{-2}$  м наблюдаем нелинейное увеличение средней производительности емкости до максимального значения. Такой ход кривой можно объяснить тем, что вся теплообменная поверхность емкости работает эффективно. За счет этого уменьшается время заполнения емкости, и как следствие, увеличивается средняя производительность емкости.

На четвертом участке происходит уменьшение средней производительности емкости до 4,742 г/с при увеличении диаметра центрального отверстия ребер до  $8,0 \cdot 10^{-2}$  м. Это вызвано тем, что существенное увеличение диаметра центрального отверстия ребер приводит к уменьшению их теплообменной поверхности.

Из графика на рисунке 3.2 видно, что максимальная производительность наблюдается при изменении диаметра центрального отверстия в ребрах от  $6,0 \cdot 10^{-2}$  до  $7,0 \cdot 10^{-2}$  м. Для более точного определения максимума этой зависимости проведен расчет при изменении диаметра центрального отверстия с шагом в  $1,0 \cdot 10^{-3}$ . Результаты уточненного расчета представлены в таблице 3.4

Таблица 3.4 – Результаты уточненного расчета

Диаметр центрального отверстия ребер $d$ , м	Время десублимации, $t$ , час	Средняя производительность емкости $q$ , г/с	Площадь теплообменной поверхности $s$ , $m^2$
$6,0 \cdot 10^{-2}$	12,716	4,671	1,596
$6,1 \cdot 10^{-2}$	12,536	4,739	1,593
$6,2 \cdot 10^{-2}$	12,431	4,778	1,599
$6,3 \cdot 10^{-2}$	12,373	4,800	1,586



Продолжение таблицы 3.4 – Результаты уточненного расчета

Диаметр центрального отверстия ребер $d$ , м	Время десублимации, $t$ , час	Средняя производительность емкости $q$ , г/с	Площадь теплообменной поверхности $s$ , м <sup>2</sup>
$6,4 \cdot 10^{-2}$	12,360	4,806	1,583
$6,5 \cdot 10^{-2}$	12,369	4,802	1,580
$6,6 \cdot 10^{-2}$	12,376	4,800	1,577
$6,7 \cdot 10^{-2}$	12,385	4,796	1,573
$6,8 \cdot 10^{-2}$	12,394	4,793	1,570
$6,9 \cdot 10^{-2}$	12,395	4,792	1,566
$7,0 \cdot 10^{-2}$	12,405	4,788	1,563

Как видно из данных, приведенных в таблице 3.4, максимальная производительность 4,806 г/с наблюдается при диаметре центрального отверстия в ребрах  $6,4 \cdot 10^{-2}$  м.

### 3.1.2 Расчет конфигурации центральных отверстий ребер емкости в виде усеченного конуса

Данная конфигурация центральных отверстий горизонтальных ребер емкости рассчитывалась при тех же условиях. Диаметр центрального отверстия ребер уменьшался линейно от верхнего 1-го ребра ( $d = 6,4 \cdot 10^{-2}$  м) к нижнему 13-му ребру с  $6,3 \cdot 10^{-2}$  м до момента «перемерзания» центрального отверстия одного из ребер с шагом в  $1,0 \cdot 10^{-3}$  м.

«Перемерзание» произошло при диаметре центрального отверстия 13-го ребра  $3,8 \cdot 10^{-2}$  м, степень заполнения емкости при этом составила 68,9 %, масса десублимата – 210,45 кг.

Результаты расчета приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Изменение времени от диаметра 13- го ребра

Диаметр центрального отверстия 13-го ребра, $d$ , м	Время десублимации, $t$ , час	Средняя производительность емкости, $q$ , г/с
$6,3 \cdot 10^{-2}$	12,357	4,807
$6,2 \cdot 10^{-2}$	12,353	4,808
$6,1 \cdot 10^{-2}$	12,350	4,810
$6,0 \cdot 10^{-2}$	12,346	4,811
$5,9 \cdot 10^{-2}$	12,343	4,812
$5,8 \cdot 10^{-2}$	12,339	4,814
$5,7 \cdot 10^{-2}$	12,337	4,815
$5,6 \cdot 10^{-2}$	12,334	4,816
$5,5 \cdot 10^{-2}$	12,332	4,817
$5,4 \cdot 10^{-2}$	12,330	4,818
$5,3 \cdot 10^{-2}$	12,327	4,819
$5,2 \cdot 10^{-2}$	12,325	4,820
$5,1 \cdot 10^{-2}$	12,322	4,821
$5,0 \cdot 10^{-2}$	12,321	4,821
$4,9 \cdot 10^{-2}$	12,319	4,822
$4,8 \cdot 10^{-2}$	12,317	4,823
$4,7 \cdot 10^{-2}$	12,315	4,823
$4,6 \cdot 10^{-2}$	12,314	4,824
$4,5 \cdot 10^{-2}$	12,312	4,824
$4,4 \cdot 10^{-2}$	12,311	4,825
$4,3 \cdot 10^{-2}$	12,310	4,825
$4,2 \cdot 10^{-2}$	12,309	4,825

Продолжение Таблицы 3.5 – Изменение времени от диаметра 13- го ребра

Диаметр центрального отверстия 13-го ребра, $d$ , м	Время десублимации, $t$ , час	Средняя производительность емкости, $q$ , г/с
$4,1 \cdot 10^{-2}$	12,308	4,8261
$4,0 \cdot 10^{-2}$	12,307	4,8264
$3,9 \cdot 10^{-2}$	12,308	4,8263
$3,8 \cdot 10^{-2}$	11,878	5,001

Из данных таблицы 3.5 видно, что максимальная средняя производительность  $q = 4,8264$  г/с для данной конфигурации наблюдается, когда диаметр центрального отверстия 1-го ребра имеет значение  $6,4 \cdot 10^{-2}$  м, а диаметр центрального отверстия 13-го ребра равен  $4,0 \cdot 10^{-2}$  м.

### 3.1.3 Расчет конфигурации центральных отверстий ребер емкости в виде усеченного конуса и цилиндра

Диаметр центрального отверстия первого ребра составлял  $6,4 \cdot 10^{-2}$  м, а диаметр отверстий последующих ребер уменьшался сначала с шагом  $2,0 \cdot 10^{-3}$  м, а затем с шагом в  $1,0 \cdot 10^{-3}$  м, образуя в верхней части емкости усеченный конус, а в нижней части емкости – цилиндр.

Средняя производительность емкости при диаметрах центрального отверстия 2-го и последующих ребер  $(4.3...4.6) \cdot 10^{-2}$  м отличалась незначительно, поэтому для определения максимума в этом диапазоне использовали расчетные значения средней производительности емкости с большим количеством знаков после запятой.

Результаты расчетов для данной конфигурации представлены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Результаты расчетов при  $d_1=6,4 \cdot 10^{-2}$  м,  $d_{2-13}$  уменьшается с шагом  $2,0 \cdot 10^{-3}$  м, а затем с шагом  $1,0 \cdot 10^{-3}$  м

Диаметр центрального отверстия, $d_{2-13}$ , м	Время десублимации, $t$ , час	Средняя производительность емкости, $q$ , г/с
$6,2 \cdot 10^{-2}$	12,347	4,811
$6,0 \cdot 10^{-2}$	12,330	4,818
$5,8 \cdot 10^{-2}$	12,325	4,820
$5,6 \cdot 10^{-2}$	12,306	4,823
$5,4 \cdot 10^{-2}$	12,308	4,826
$5,2 \cdot 10^{-2}$	12,302	4,829
$5,0 \cdot 10^{-2}$	12,297	4,830
$4,9 \cdot 10^{-2}$	12,295	4,831
$4,8 \cdot 10^{-2}$	12,294	4,832
$4,7 \cdot 10^{-2}$	12,293	4,832
$4,6 \cdot 10^{-2}$	12,292	4,833
$4,5 \cdot 10^{-2}$	12,291	4,833
$4,4 \cdot 10^{-2}$	12,291	4,833
$4,3 \cdot 10^{-2}$	12,291	4,833
$4,2 \cdot 10^{-2}$	12,292	4,832
$4,1 \cdot 10^{-2}$	12,295	4,831
$4,0 \cdot 10^{-2}$	12,296	4,832
$3,9 \cdot 10^{-2}$	12,296	4,831
$3,8 \cdot 10^{-2}$	11,923	4,528

«Перемерзание» емкости также наступило при диаметре отверстия 13-го ребра равном  $3,8 \cdot 10^{-2}$  м при заполнении емкости на 63,6 %, масса десублимата – 194,37 кг.

Из данных таблицы 3.6 видно, что максимальная производительность при такой конфигурации наблюдается при диаметрах центрального отверстия 2-го и последующих ребер  $(4,3...4,6) \cdot 10^{-2}$  м и она составляет 4,833 г/с.

Некоторая неточность результатов расчетов связана с тем, что в используемой программе диаметр центральных отверстий в ребрах задавался с точностью до 1 мм, поэтому при определении диаметра отверстий в конусной части приходилось проводить его округление в большую или меньшую сторону. Особенно это проявилось на нижних ребрах, где диаметр центральных отверстий значительно меньше, чем на верхних [25].

Для более точного определения диаметра центрального отверстия было взято значение средней производительности  $q$  с большим количеством знаков после запятой.

Результаты расчета приведены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Результаты расчетов средней производительности  $q$  при  $d_{2-13} = (4,3...4,6) \cdot 10^{-2}$  м

Диаметр центрального отверстия $d_{2-13}$ , м	Время десублимации, $t$ , час	Средняя производительность емкости, $q$ , г/с
$4,6 \cdot 10^{-2}$	12,2920	4,83253
$4,5 \cdot 10^{-2}$	12,2911	4,83277
$4,4 \cdot 10^{-2}$	12,2910	4,83280
$4,3 \cdot 10^{-2}$	12,2913	4,83269

Из данных таблицы 3.7 видно, что максимальная производительность наблюдается при диаметрах центрального отверстия 2-го и последующих ребер  $4,4 \cdot 10^{-2}$  м и она составляет 4,83280 г/с.

В связи с этим для следующей конфигурации центральных отверстий ребер емкости в виде двух цилиндров разного диаметра были выбраны диаметры  $6,4 \cdot 10^{-2}$  м и  $4,4 \cdot 10^{-2}$  м.

Аналогично рассчитана данная конфигурация при смещении усеченного конуса с 3-го ребра по 12-ое. Результаты представлены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Результаты расчетов средней производительности  $q$  при  $d = (4,3 \dots 4,6) \cdot 10^{-2}$  м для ребер, на которых начинается цилиндр с 3-го по 12-ое

$d_{N-13} \cdot 10^{-2}$ , м \ $N$	4,3	4,4	4,5	4,6
3	4,8321	4,8322	4,8321	4,8319
4	4,8315	4,8315	4,8315	4,8312
5	4,8308	4,8306	4,8306	4,8302
6	4,8302	4,8301	4,8302	4,8296
7	4,8293	4,8293	4,8290	4,8288
8	4,8288	4,8287	4,8283	4,8280
9	4,8281	4,8277	4,8275	4,8270
10	4,8268	4,8265	4,8264	4,8263
11	4,8264	4,8264	4,8259	4,8256
12	4,8260	4,8256	4,8251	4,8246

Из таблицы 3.8. видно, что с увеличением номера ребра, с которого начинается цилиндрическая часть центральных отверстий, средняя производительность  $q$  уменьшается. Это значит, что оптимальной конфигурацией, состоящей из усеченного конуса в верхней части и цилиндра в нижней, является случай, когда усеченный конус расположен между 1-ым и 2-ым горизонтальным ребром, а со 2-ое ребра по 13-ое центральные отверстия имеют форму цилиндра с диаметром  $4,4 \cdot 10^{-2}$ .

### 3.1.4 Расчет конфигурации центральных отверстий ребер емкости в виде двух цилиндров разного диаметра

Расчет конфигурации в виде двух цилиндров проводился при тех же условиях. Диаметр верхнего цилиндра равен  $6,4 \cdot 10^{-2}$  м, нижнего  $4,4 \cdot 10^{-2}$  м.

Результаты расчетов средней производительности  $q$  от количества ребер первого цилиндра, имеющего диаметр  $d = 6,4 \cdot 10^{-2}$  м, представлены в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Результаты расчетов средней производительности  $q$  от количества ребер первого цилиндра, имеющего диаметр  $d = 6,4 \cdot 10^{-2}$  м

$N_l$ , шт	Время десублимации, т, ч	Средняя производительность емкости, $q$ , г/с
1	12,291	4,8328
2	12,297	4,831
3	12,303	4,828
4	12,308	4,826
5	12,314	4,824
6	12,320	4,821

Из таблицы 3.9 видно, что с увеличением высоты первого цилиндра, имеющего диаметр  $6,4 \cdot 10^{-2}$  м, средняя производительность емкости уменьшается, поэтому дальше продолжать расчет нецелесообразно.

Максимальная средняя производительность 4,8328 г/с наблюдается, когда первое ребро имеет диаметр центрального отверстия  $6,4 \cdot 10^{-2}$  м, а последующие 12 ребер имеют диаметр центральных отверстий  $4,4 \cdot 10^{-2}$  м.

### 3.1.5 Расчет конфигурации центральных отверстий ребер емкости в виде трех цилиндров разного диаметра

Поскольку средняя производительность емкости увеличивалась при конфигурации центральных отверстий в ребрах в виде двух цилиндров разного диаметра, то имело смысл рассмотреть еще одну конфигурацию, состоящую из трех цилиндров при тех же условиях расчета.

Из предыдущего расчета взят диаметр центральных отверстий первых двух ребер  $6,4 \cdot 10^{-2}$  м, диаметр второго цилиндра –  $4,4 \cdot 10^{-2}$  м, а диаметр третьего цилиндра взят из результатов расчета конфигурации отверстий в ребрах в виде усеченного конуса –  $4,0 \cdot 10^{-2}$  м.

Ввиду того, что количество результатов расчета с перебором диаметров центральных отверстий в 3-х цилиндрах довольно большое, в таблице 3.10 привели выборочно данные, показывающие оптимальную конфигурацию для данной емкости.

Таблица 3.10 – Результаты расчетов средней производительности  $q$  от количества ребер первого цилиндра, имеющего диаметр  $d = 6,4 \cdot 10^{-2}$  м, и третьего цилиндра, имеющего диаметр  $d = 4,0 \cdot 10^{-2}$  м

$N_1$ , шт	$N_3$ , шт	$q$ , г/с
2	1	4,8304
2	2	4,8303
2	3	4,8302
2	4	4,8301
2	5	4,8300
3	1	4,8282
3	2	4,8281
3	3	4,8280
3	4	4,8279
3	5	4,8277



Из таблицы 3.10 видно, что при увеличении количества ребер в первом и третьем цилиндре наблюдается уменьшение средней производительности емкости  $q$ .

Таким образом, оптимальным вариантом конфигурации, состоящей из 3-х цилиндров разного диаметра является вариант, когда отверстие первого ребра имеет диаметр  $6,4 \cdot 10^{-2}$  м, отверстия в ребрах со 2-ого по 12-ое имеют диаметр  $4,4 \cdot 10^{-2}$  м, а отверстие нижнего ребра –  $4,0 \cdot 10^{-2}$  м.

### 3.2 Сравнение полученных результатов

В результате проведенных расчетов получены данные для различных конфигураций центрального отверстия в ребрах емкости объемом  $0,06 \text{ м}^3$ .

В таблице 3.11 представлены максимальные значения средней производительности емкости с различной конфигурацией центрального отверстия в ребрах для сравнения.

Таблица 3.11 – Расчетные данные для различных конфигураций центральных отверстий в ребрах

Конфигурация	$d \cdot 10^{-2}$ , м	$t$ , час	$q$ , г/с	$s$ , $\text{м}^2$
Стандартная емкость	$d_{1-13}=6,0 \cdot 10^{-2}$ м	12,716	4,671	1,596
Цилиндр	$d_{1-13}=6,4 \cdot 10^{-2}$ м	12,360	4,806	1,583
Усеченный конус	$d_1=6,4 \cdot 10^{-2}$ м $d_{13}=4,0 \cdot 10^{-2}$ м	12,308	4,828	1,616
Усеченный конус и цилиндр	$d_1=6,4 \cdot 10^{-2}$ м $d_{2-13}=4,4 \cdot 10^{-2}$ м	12,291	4,833	1,632
Два цилиндра	$d_{1-2}=6,4 \cdot 10^{-2}$ м $d_{3-13}=4,4 \cdot 10^{-2}$ м	12,296	4,831	1,628
Три цилиндра	$d_{1-2}=6,4 \cdot 10^{-2}$ м $d_{3-12}=4,4 \cdot 10^{-2}$ м $d_{13}=4,0 \cdot 10^{-2}$ м	12,297	4,830	1,629

Для сравнения со стандартной емкостью, объемом  $0,06 \text{ м}^3$  с горизонтальным оребрением и диаметром центрального отверстия  $6,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}$  был посчитан относительного изменения  $\delta$  средней производительности  $q$ .

$$\delta = \frac{q_K - q_0}{q_K} \cdot 100, \quad (3.2.1)$$

где  $q_K$  – средняя производительность конфигурации;

$q_0$  – средняя производительность стандартной конфигурации.

Результаты расчета приведены в таблице 3.12.

Таблица 3.12 – Значения относительного изменения  $\delta$

Конфигурация	Относительное изменение, $\delta$ , %
Стандартная емкость	—
Цилиндр	2,80
Усеченный конус	3,21
Усеченный конус и цилиндр	3,34
Два цилиндра	3,30
Три цилиндра	3,29

Из таблицы 3.12 видно, что оптимальной является конфигурация, состоящая из усеченного конуса в верхней части емкости и цилиндра, начинающегося со 2-го ребра.

Использование различных конфигураций центральных отверстий в ребрах емкости приводит к незначительному увеличению ее средней производительности (на 2,80...3,34 %), поэтому с точки зрения простоты изготовления данной емкости рекомендовано использовать конфигурацию центральных отверстий в виде цилиндра с диаметром  $6,4 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ .

## **4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

Целью данного раздела является проектирование и создание конкурентоспособных разработок и технологий, отвечающих предъявляемым требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

Достижение цели обеспечивается решением задач:

- разработка общей экономической идеи проекта, формирование концепции проекта;
- организация работ по научно-исследовательскому проекту;
- определение возможных альтернатив проведения научных исследований;
- планирование научно-исследовательских работ;
- оценки коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения;
- определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования [41].

Данная ВКР направлена на исследование и оптимизацию процесса десублимации  $UF_6$  в вертикальных погружных емкостях с горизонтальным оребрением.

### **4.1 Потенциальные потребители результатов исследования**

Результатом исследования является получение расчётной модели динамики десублимации гексафторида урана с учетом геометрии емкости.

Целевым рынком данного исследования будут являться государственные корпорации по атомной энергетике, атомная и смежные отрасли научной промышленности, области производства, основная цель которых, это использование емкостей с высокими физико-химическими показателями, например, хранилища уранового топлива.

Сегментировать рынок услуг можно по степени потребности использования данной методики. Результаты сегментирования представлены в рисунке 4.1.

		Расчётная модель динамики десублимации гексафторида урана с учетом геометрии емкости			
		Атомная промышленность	Научная отрасль	Иные производственные отрасли	Экспорт UF <sub>6</sub>
Потребность	Сильная				
	Слабая				

Рисунок 4.1 – Карта сегментирования рынка услуг по использованию оптимальной методики измерения

#### 4.1.2 Анализ конкурентных технических решений

Главное преимущество теоретического математического моделирования – это возможность получения геометрических параметров, при которых будет получена емкость с нужными, для определенных целей, характеристиками. Расчётная модель позволяет также избавиться от многочисленных экспериментов и крупных финансовых затрат на их реализацию. Исходя из этого конкурентами разработанной модели являются:

- Экспериментальные исследования динамики десублимации гексафторида урана в зависимости от геометрии емкости;
- Теоретический расчёт параметров десублимации гексафторида урана в зависимости от геометрии емкости.

Оценочная карта анализа разработанной модели, по которой была изучена динамика заполнения емкости, представлена в таблице 4.1. Позиция

разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1. Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i, \quad (4.1.1)$$

где  $K$  – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

$B_i$  – вес показателя (в долях единицы);

$B_i$  – балл  $i$ -го показателя.

Для оценки конкурентных решений были выбраны следующие критерии: повышение производительности труда (насколько данное техническое решение поможет увеличить производительность труда на предприятии); удобство эксплуатации (возможность удобного использования модели для получения необходимых результатов); экономичность (сокращение материальных затрат на получение необходимых данных); надежность (точность и корректность получения данных в любой момент); закрытость получаемых данных (данный пункт важен для того, чтобы доступ к данным расчетной модели имел определенный круг лиц, а также, чтобы модель не оптимизировалась под новые параметры без участия разработчиков); потребность в материальных ресурсах (получение необходимых данных без высокого уровня затрат); стабильность (безотказность расчетной модели при различных устанавливаемых параметрах в любой момент времени); доступность (возможность приобретения предприятиями данной расчетной модели, либо получения результатов расчета заказчиками); конкурентоспособность (преимущества данной расчетной модели над иными способами получения данных); затраты на разработку (сколько потрачено материальных ресурсов на реализацию модели); предполагаемый срок эксплуатации (в течении какого периода возможно получать необходимые данные тем или иным способом); финансирование разработанного метода

(начальное и дальнейшее вложение средств для получения данных различными способами).

Таблица 4.1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б <sub>ф</sub>	Б <sub>к1</sub>	Б <sub>к2</sub>	К <sub>ф</sub>	К <sub>к1</sub>	К <sub>к2</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Повышение производительности труда пользователя	0,1	5	4	3	0,5	0,4	0,3
2. Удобство эксплуатации	0,15	5	4	3	0,75	0,6	0,45
3. Экономичность	0,03	5	2	3	0,15	0,06	0,09
4. Надежность	0,1	5	4	3	0,5	0,4	0,3
5. Закрытость получаемых данных	0,05	5	5	5	0,25	0,25	0,25
6. Потребность в материальных ресурсах	0,05	5	1	4	0,25	0,05	0,2
7. Стабильность	0,06	5	3	3	0,3	0,18	0,18
8. Доступность	0,1	5	4	4	0,5	0,4	0,4
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Конкурентоспособность метода	0,04	5	4	3	0,2	0,16	0,12
2. Затраты на разработку	0,12	5	1	3	0,6	0,12	0,36
3. Предполагаемый срок эксплуатации	0,1	5	2	3	0,5	0,2	0,3
4. Финансирование разработанного метода	0,1	5	1	3	0,5	0,1	0,3
Итого	1				5	2,92	3,25

Были рассмотрены технические критерии и экономические критерии оценки эффективности, общий вес которых равен 1. Каждому критерию была присвоена оценка от 1 до 5, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная.

Для математической модели, представленной в работе, важными показателями являются: повышение производительности труда, конкурентоспособность составляет 0,4 и 0,3 балла; надежность – 0,4 и 0,3 балла для экспертов; доступность 0,4 и 0,4 балла; предполагаемый срок эксплуатации 0,2 и 0,3 балла, соответственно; финансирование разработанного метода 0,1 и 0,3 балла.

Менее важными критериями были выбраны: экономичность 0,06 и 0,09 балла; потребность в материальных ресурсах 0,05 и 0,2 балла, конкурентоспособность метода 0,16 и 0,12 балла.

На основании представленного выше анализа можно сделать вывод, что разработанная в данной работе модель является наиболее оптимальной для использования в практических целях. Конкурентные методы имеют ряд недостатков, исключаемых разработанной моделью. Например, многочисленные эксперименты, которые требуют больших финансовых и затрат. Эксперименты требуют большого запаса времени, так как разделительное производство – это длительный процесс и теоретический расчет необходим, для работы производства без ошибок и экономии времени на их устранение.

Таким образом, разработанная модель позволяет существенно снизить финансовые затраты, обеспечивает высокую точность расчётных значений и имеет высокий потенциал развития в дальнейшем.

#### **4.1.3 SWOT-анализ**

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой

комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

Сильные стороны – это факторы, характеризующие конкурентоспособную сторону научно-исследовательского проекта. Сильные стороны свидетельствуют о том, что у проекта есть отличительное преимущество или особые ресурсы, являющиеся особенными с точки зрения конкуренции. Другими словами, сильные стороны – это ресурсы или возможности, которыми располагает руководство проекта и которые могут быть эффективно использованы для достижения поставленных целей.

Слабые стороны – это недостаток, упущение или ограниченность научно-исследовательского проекта, которые препятствуют достижению его целей. Это то, что плохо получается в рамках проекта или где он располагает недостаточными возможностями или ресурсами по сравнению с конкурентами.

Возможности включают в себя любую предпочтительную ситуацию в настоящем или будущем, возникающую в условиях окружающей среды проекта, например, тенденцию, изменение или предполагаемую потребность, которая поддерживает спрос на результаты проекта и позволяет руководству проекта улучшить свою конкурентную позицию.

Угроза представляет собой любую нежелательную ситуацию, тенденцию или изменение в условиях окружающей среды проекта, которые имеют разрушительный или угрожающий характер для его конкурентоспособности в настоящем или будущем 42].

В результате была составлена итоговая матрица SWOT-анализа, представленная в таблице 4.2.



Таблица 4.2 – SWOT-анализ

	<p>Сильные стороны проекта:</p> <p>С1. Актуальность проекта.</p> <p>С2. Применение современного оборудования на стадии расчета</p> <p>С3. Бюджетное финансирование.</p> <p>С4. Получение результатов высокой точности.</p> <p>С5. Возможность оптимизации расчётной модели.</p>	<p>Слабые стороны проекта:</p> <p>Сл1. Ограниченное применение конкретной модели.</p> <p>Сл2. Требуется экспериментальное подтверждение результатов.</p> <p>Сл3. Закрытость программного кода.</p> <p>Сл4. Ограниченный круг потребителей.</p> <p>Сл5. Ограниченные возможности расчёта (только для определенных компонентов).</p>
<p>Возможности:</p> <p>В1. Использование модели для исследований.</p> <p>В2. Расширение возможностей расчётной модели.</p> <p>В3. Возможность исследования различных емкостей.</p> <p>В4. Дополнительный спрос на результаты исследования.</p>	<p>1. Полное обеспечение условий для создания и применения модели для расчётов.</p> <p>2. Появление дополнительного спроса и финансирования, обеспеченных актуальностью тематики и использованием современных расчётных моделей.</p> <p>3. Высокая точность получаемых результатов позволяет повысить спрос на расчётную модель</p>	<p>1. Необходимо экспериментальное подтверждение, что возможно реализовать в условиях вуза.</p> <p>2. Закрытость расчётной модели не отражается на точности результатов.</p> <p>3. Круг потребителей можно увеличить с помощью увеличения возможностей расчётной модели.</p>
<p>Угрозы:</p> <p>У1. Низкий спрос со стороны предприятий.</p> <p>У2. Вероятность разработки подобных расчётных моделей другими организациями.</p> <p>У3. Сложность в продвижении модели.</p> <p>У4. Разработка новейших моделей расчёта.</p>	<p>1. Внедрение разработки в научные центры и институты позволит увеличить охват пользователей и следовательно, заинтересованность предприятий.</p> <p>2. Благодаря возможностям расчётной модели и своевременному финансированию продвижение на рынок может стать успешным.</p> <p>3. Так как существует возможность оптимизации расчётной модели, то это позволит конкурировать с новейшими разработками.</p> <p>4. Дополнительное финансирование позволит продвинуть расчётную модель на рынок.</p>	<p>1. Создание подобных моделей другими организациями можно решить с помощью возможностей расчётной модели, которых нет у конкурентов.</p> <p>2. Несовершенства разработанной модели можно решить с помощью оптимизации модели под требуемые параметры.</p>

В таблице 4.3 представлена интерактивная матрица проекта, в которой показано соотношение сильных сторон с возможностями и слабых сторон с угрозами, что позволяет более подробно рассмотреть перспективы разработки

Таблица 4.3 – Интерактивная матрица проекта

Возможности проекта	Сильные стороны проекта				
	C1	C2	C3	C4	C5
B1	+	-	0	+	+
B2	+	-	-	0	+
B3	+	+	-	+	+
B4	+	-	+	+	+

В матрице пересечения сильных сторон и возможностей имеет определенный результат: «+» – сильное соответствие сильной стороны и возможности, «-» – слабое соотношение, «0» – если есть сомнения в том, что поставить «+» или «-».

Таким образом, выполнив SWOT-анализ можно сделать вывод, что на данный момент преимущества разработанной модели такие как корректность, точность получаемых данных, возможность оптимизации модели, экономичность, стабильность, доступность, удобство эксплуатации, возможность получения данных «здесь и сейчас» значительно преобладают над её недостатками (небольшой круг потребителей, закрытость). Отрицательный эффект от влияния слабых сторон или угроз возможно снизить, если внедрить модель расчета на производство и научные центры ядерной промышленности.

## 4.2 Планирование научно-исследовательской работы

### 4.2.1 Иерархическая структура работ проекта

Иерархическая структура работ (ИСР) – детализация укрупненной структуры работ. В процессе создания ИСР структурируется и определяется содержание всего проекта. Иерархическая структура работ приведена на рисунке 4.2.



Рисунок 4.2 – Иерархическая структура работ

#### 4.2.2 Контрольные события проекта

Ключевые события исследовательского проекта, их даты и результаты приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Контрольные события проекта

№	Контрольное событие	Дата	Результат (подтверждающий документ)
1	Разработка технического задания на НИР	1.02.2021	Приказ по ИШЯТ
2	Составление и утверждение технического задания	3.02.2021	Задание на выполнение исследования
3	Выбор направления исследований	5.02.2021	-
4	Подбор и изучение материалов по теме	10.02.2021	Отчёт
5	Календарное планирование работ	12.02.2021	План работ
6	Изучение возможностей расчётной модели	13.02.2021	Отчёт

Продолжение таблицы 4.4 – Контрольные события проекта

	Контрольное событие	Дата	Результат (подтверждающий документ)
7	Освоение методики расчёта на практике	14.02.2021	Отчёт
8	Проведение расчётов	15.02.2021- 30.03.2021	Отчёт
9	Анализ полученных данных	28.03.2021	Отчёт
10	Обобщение и оценка результатов	30.03.2021	Отчёт
11	Составление пояснительной записки	14.02.2021- 25.04.2021	Пояснительная записка
12	Проверка правильности выполнения ГОСТа пояснительной записки	26.04.2021	-
13	Подготовка к защите	11.04.2021- 25.05.2021	-

#### 4.2.3 Определение трудоемкости выполнения НИР

Необходимо спланировать работу каждого участника эксперимента и сроки их проведения. Для оптимизации работ удобнее всего использовать классический метод линейного планирования и управления.

Результатом такого планирования является составление линейного графика выполнения всех работ. Расчет параметров линейного графика требует определение продолжительности работ.

Трудоемкость выполнения НИР оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов [41].

Для определения, ожидаемого (среднего) значения трудоемкости работ  $t_{ож}$  используется следующая формула:

$$t_{ож\ i} = \frac{3t_{min\ i} + 2t_{max\ i}}{5}, \quad (4.2.1)$$

где  $t_{ож\ i}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения  $i$ -ой работы, чел.-дн.;

$t_{min\ i}$  – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

$t_{max\ i}$  – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях  $T_p$ , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями.

Такое вычисление необходимо для обоснованного расчета заработной платы, так как удельный вес зарплаты в общей сметной стоимости научных исследований составляет около 65 %.

$$T_{pi} = \frac{t_{ож\ i}}{Ч_i}, \quad (4.2.2)$$

где  $T_{pi}$  – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$t_{ож\ i}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.;

$Ч_i$  – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

#### 4.2.4 Разработка графика проведения научного исследования

Для удобства построения календарного план–графика, длительность этапов в рабочих днях переводится в календарные дни и рассчитывается по формуле:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k, \quad (4.2.3)$$

где  $T_{ki}$  – продолжительность выполнения  $i$ -ой работы в календарных днях;

$T_{pi}$  – продолжительность одной работы в рабочих днях;

$k$  – коэффициент календарности, предназначен для перевода рабочего времени в календарное.

Коэффициент календарности рассчитывается по формуле:

$$k = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вд}} - T_{\text{нд}}}, \quad (4.2.4)$$

где  $T_{\text{кал}}$  – количество календарных дней в году;

$T_{\text{вд}}$  – количество выходных дней в году;

$T_{\text{нд}}$  – количество праздничных дней в году

Расчетная величина продолжительности работ  $T_k$ ,  $T_p$  округляется до целых чисел.

На примере составления и утверждения технического задания рассмотрим методику расчета временных показателей:

$t_{\text{min } 1} = 1$  человека - день,  $t_{\text{max } 1} = 2$  человека - дня;

$$t_{\text{ож } 1} = \frac{3 \cdot t_{\text{min } 1} + 2 \cdot t_{\text{max } 1}}{5} = \frac{3 \cdot 1 + 2 \cdot 2}{5} = 1,4 \text{ человека - дня};$$

$$T_{p1} = 1,4 \text{ рабочих дней};$$

$$k_{5\text{-ти}} = 1,478; k_{6\text{-ти}} = 1,22;$$

$$T_{k1} = 1,4 \cdot 1,478 = 2,069 = 2 \text{ календарных дня}.$$

Аналогичным образом проводим расчеты для других этапов научного исследования и сводим результаты в табл. 4.5.

Таблица 4.5 – Временные показатели проведения НИР

Название	Трудоемкость работ, чел.-дни			Исполнители	Длительность работ в рабочих днях, $T_p$	Длительность работ в календарных днях, $T_k$
	$t_{\text{min}}$	$t_{\text{min}}$	$t_{\text{ож}}$			
Разработка технического задания	1	2	1,4	Руководитель	1	2
Составление и утверждение технического задания	1	1	1	Руководитель	1	1
Выбор направления исследований	1	3	1,8	Руководитель, Турбина И. А.	1	1

Продолжение таблицы 4.5 – Временные показатели проведения НИР

Название	Трудоемкость работ, чел.-дни			Исполнители	Длительность работ в рабочих днях, $T_p$	Длительность работ в календарных днях, $T_k$
	$t_{\min}$	$t_{\min}$	$t_{\text{ож}}$			
Подбор и изучение материалов по теме	5	7	5,8	Турбина И. А.	6	9
Календарное планирование работ	1	1	1	Руководитель, Турбина И. А.	1	1
Изучение возможностей расчётной модели	1	2	1,4	Турбина И. А.	1	2
Освоение методики расчёта на практике	1	2	1,4	Турбина И. А.	1	2
Проведение расчётов	25	40	31	Руководитель, Турбина И. А.	16	23
Анализ полученных данных	1	3	1,8	Руководитель, Турбина И. А.	2	3
Обобщение и оценка результатов	1	1	1	Руководитель, Турбина И. А.	1	1
Составление пояснительной записки	20	30	24	Турбина И. А.	24	35
Проверка правильности выполнения ГОСТа пояснительной записки	1	2	1,4	Руководитель, Турбина И. А.	1	1
Подготовка к защите	7	14	9,8	Турбина И. А.	10	14



































Календарный план-график в виде диаграммы Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

График строится на основе данных из таблицы 4.5 с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени дипломирования. Работы на графике выделены различным штрихом в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу.


В таблице 4.6 представлен календарный план-график проведения научного исследования.



Таблица 4.6 – Календарный план-график проведения научного исследования

№ работ	Вид работ	Исполнители	Т <sub>к</sub> , кал.дн	Продолжительность выполнения работ													
				Феврал ь	Март						Апрель			Май			Июн ь
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
1	Разработка технического задания	Руководитель	2														
2	Составление и утверждение технического задания	Руководитель	1														
3	Выбор направления исследований	Руководитель, Турбина И. А.	1	 													
4	Подбор и изучение материалов по теме	Турбина И. А.	9		 												
5	Календарное планирование работ	Руководитель, Турбина И. А.	1		 												
6	Изучение возможностей расчётной модели	Турбина И. А.	2														
7	Освоение методики расчёта на практике	Турбина И. А.	2														
8	Проведение расчётов	Турбина И. А.	23														
9	Анализ полученных данных	Турбина И. А.	3														
10	Обобщение и оценка результатов	Руководитель, Турбина И. А.	1						 								
11	Составление пояснительной записки	Турбина И. А.	35											 			
12	Проверка правильности выполнения ГОСТа пояснительной записки	Руководитель, Турбина И. А.	1										 				
13	Подготовка к защите	Турбина И. А.	14														

 – Руководитель

 – Турбина И. А.

### 4.3 Бюджет научного исследования

При планировании бюджета исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В процессе формирования бюджета используется следующая группировка затрат по статьям:

- материальные затраты;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы.

#### 4.3.1 Расчёт материальных затрат

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_M = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{расхi}, \quad (4.3.1)$$

где  $m$  – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;

$N_{расхi}$  – количество материальных ресурсов  $i$ -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м<sup>2</sup> и т.д.);

$C_i$  – цена приобретения единицы  $i$ -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м<sup>2</sup> и т.д.);

$k_T$  – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы, принимаются в пределах 15 – 25 % от стоимости материалов.

Основными затратами в данной исследовательской работе являются затраты на электроэнергию и приобретение канцелярских товаров. Результаты расчётов по затратам на материалы приведены в таблице 4.7.

Затраты на электроэнергию для работы ПЭВМ рассчитываются по формуле:

$$Z_{\text{м}} = C_{\text{эл}} \cdot P \cdot F_{\text{об}} = 3,66 \cdot 0,5 \cdot 800 = 1464, \quad (4.3.2)$$

где  $C_{\text{эл}}$  – тариф на промышленную электроэнергию (3,66 руб. за 1 кВт·ч);

$P$  – мощность оборудования, кВт;

$F_{\text{об}}$  – время использования оборудования, ч.

Затраты на электроэнергию составили 1464 рубля.

#### 4.3.2 Основная заработная плата исполнителей темы

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением проекта, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату.

$$Z_{\text{зн}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}, \quad (4.3.3)$$

где  $Z_{\text{осн}}$  – основная заработная плата;  $Z_{\text{доп}}$  – дополнительная заработная плата.

Основная заработная плата ( $Z_{\text{осн}}$ ) руководителя рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{р}}, \quad (4.3.4)$$

где  $Z_{\text{осн}}$  – основная заработная плата одного работника;

$T_{\text{р}}$  – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб.дн.;

$Z_{\text{дн}}$  – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = (Z_{\text{м}} \cdot M) / F_{\text{д}}, \quad (4.3.5)$$

где  $Z_{\text{м}}$  – месячный должностной оклад работника, руб.;

$M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

– при отпуске в 24 раб. дня  $M = 11,2$  месяца, 5-дневная неделя;

– при отпуске в 48 раб. дней  $M = 10,4$  месяца, 6-дневная неделя;

–  $F_{\text{д}}$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (таблица 4.8).

Таблица 4.8 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Турбина И.А.
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней (выходные дни/праздничные дни)	66	118
Потери рабочего времени:		
– отпуск;	56	28
– невыходы по болезни	–	–
Действительный годовой фонд рабочего времени	243	219

Основная заработная плата научного руководителя рассчитывается на основании отраслевой оплаты труда. Отраслевая система оплаты труда в ТПУ предполагает следующий состав заработной платы:

- оклад – определяется предприятием. В ТПУ оклады распределены в соответствии с занимаемыми должностями, например, ассистент, ст. преподаватель, доцент, профессор.

- стимулирующие выплаты – устанавливаются руководителем подразделений за эффективный труд, выполнение дополнительных обязанностей и т.д.

- иные выплаты: районный коэффициент.

Руководителем данной научно-исследовательской работы является сотрудник с должностью профессор и степенью доктор наук. Оклад профессора составляет 32566 рублей (без учета РК).

Исполнителем является инженер-исследователь Турбина И. А., оклад инженера составляет 13786 руб. (без учета РК).

Для расчета месячного должностного оклада работника применяется формула:

$$Z_m = Z_{mc} \cdot (1 + k_{np} + k_d) \cdot k_p, \quad (4.3.6)$$

где  $Z_{mc}$  – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_{np}$  – премиальный коэффициент, равный 0,3;

$k_d$  – коэффициент доплат и надбавок, составляет примерно 0,2-0,5 (в НИИ и на промышленных предприятиях – за расширение сфер обслуживания, за профессиональное мастерство, за вредные условия: 15-20 % от  $Z_{mc}$ );

$k_p$  – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Таблица 4.9 – Заработная плата исполнителей исследовательской работы

Исполнители	$Z_{mc}$ , руб.	$k_{np}$	$k_d$	$k_p$	$Z_m$ , руб.	$Z_{дн}$ , руб.	$T_k$ , дни	$Z_{осн}$ , руб.
Руководитель	32566	0,3	0,2	1,3	63503,7	2717,9	7	19025,0
Турбина И.А.	13786	0,3	-	1,3	23298,3	1191,5	92	109619,0
Итого $Z_{осн}$ :								128644

#### 4.3.2 Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций (при исполнении государственных и общественных обязанностей, при совмещении работы с обучением, при предоставлении ежегодного оплачиваемого отпуска и т.д.).

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн}, \quad (4.3.7)$$

где  $Z_{доп}$  – дополнительная заработная плата, руб.;

$k_{доп}$  – коэффициент дополнительной зарплаты ( $k_{доп} = 0,14$ );

$Z_{осн}$  – основная заработная плата, руб.

В таблице 4.10 приведен расчет основной и дополнительной заработной платы.

Таблица 4.10 – Заработная плата исполнителей ВКР

Заработная плата	Руководитель	Турбина И. А.
Основная зарплата $Z_{осн}$ , руб.	19025,0	109619,0
Дополнительная зарплата $Z_{доп}$ , руб.	2663,5	15346,7
Итого по статье $Z_{зн}$ , руб	21688,5	124965,7
Итого	146654,2	

#### 4.3.3 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Размер отчислений во внебюджетные фонды составляет 30,2 % от суммы затрат на оплату труда работников, непосредственно занятых выполнением исследовательской работы [43].

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}), \quad (4.3.8)$$

где  $k_{внеб}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

Величина отчислений во внебюджетные фонды составляет:

$$Z_{внеб} = 0,302 \cdot 149472,8 = 44289,6 \text{ руб.}$$

#### 4.3.4 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование

материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, размножение материалов и т.д. Их величина определяется по следующей формуле:

$$Z_{\text{накл}} = k_{\text{нр}} \cdot (Z_{\text{мат}} + Z_{\text{внеб}} + Z_{\text{осн}}) \quad (4.3.9)$$

$$Z_{\text{накл}} = 0,16 \cdot (1464 + 44289,6 + 128644,0) = 27903,6 \text{ руб.}$$

Величину коэффициента накладных расходов  $k_{\text{нр}}$  можно взять в размере 16%.

#### 4.3.5 Формирование бюджета затрат исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции.

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 4.11.

Таблица 4.11 – Расчёт бюджета затрат исследовательского проекта

Наименование статьи	Сумма, руб	
	Руководитель	Турбина И. А.
1. Материальные затраты исследования	1464	
2. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	19025,0	109619,0
3. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	2663,5	15346,7
4. Отчисления во внебюджетные фонды	6549,9	37739,6
5. Накладные расходы	4326,2	23811,6
Общие затраты исполнителя	32564,6	186517,0
Общий бюджет затрат исследования	220545,6	

Определенная себестоимость проекта составляет 220545,6 руб., а время, необходимое для ее выполнения 92 календарных дней.

#### 4.4 Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности проекта

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (4.4.1)$$

где  $I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}$  – интегральный финансовый показатель разработки;

$\Phi_{pi}$  – стоимость  $i$ -го варианта исполнения;

$\Phi_{\text{max}}$  – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта.

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}1} = \frac{32564,6}{220545,6} = 0,15$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}2} = \frac{186517,0}{220545,6} = 0,85$$

Полученная величина интегрального финансового показателя проекта отражает соответствующее численное удешевление стоимости разработки, т.к. полученное значение для разных исполнителей не превышает единицы.

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i, \quad (4.4.2)$$



где  $I_{pi}$  – интегральный показатель ресурсоэффективности для  $i$ -го варианта исполнения разработки;

$a_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го варианта исполнения разработки;

$b_i^a, b_i^p$  – бальная оценка  $i$ -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

$n$  – число параметров сравнения [41].

Таблица 4.12 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Объект исследования Критерии	Весовой коэффициент параметра	Руководитель (исп.1)	Турбина И. А. (исп.2)
Точность вычислений	0,25	5	4
Скорость производства расчетов	0,1	4	3
Удобство в эксплуатации	0,15	5	5
Визуализация результатов	0,2	5	5
Экономия средств	0,3	5	5
Итого	1	4,8	4,4

$$I_{p-исп1} = 5 \cdot 0,25 + 5 \cdot 0,1 + 5 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,3 = 5;$$

$$I_{p-исп2} = 4 \cdot 0,25 + 3 \cdot 0,1 + 5 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,3 = 4,55.$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки:

$$I_{исп.i} = \frac{I_{p-исп.i}}{I_{финр}}, \quad (4.4.3)$$

$$I_{исп.1} = \frac{5}{0,15} = 33,86$$

$$I_{исп.2} = \frac{4,55}{0,85} = 5,38$$

С целью определения наиболее целесообразного варианта из предложенных сравним интегральные показатели эффективности вариантов исполнения разработки и определим сравнительную эффективность проекта:

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{исп.1}}}{I_{\text{исп.2}}}, \quad (4.4.4)$$

Таблица 4.13 – Сравнительная эффективность разработки

№	Показатель	Исп.1	Исп.2
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,15	0,85
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	5	4,55
3	Интегральный показатель эффективности	33,86	5,38
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	6,29	

Сравнив значения интегральных показателей эффективности, можно сделать вывод, что реализация НИР в первом исполнении является более эффективным вариантом решения задачи, поставленной в данной работе с позиции финансовой и ресурсной эффективности, т.к. в первом исполнении требуется меньше времени для проведения исследования, а, следовательно меньше затрат на заработную плату исполнителя.

#### **4.5 Выводы по разделу «Финансовый менеджмент ресурсоэффективность и ресурсосбережение»**

На основе проведенного анализа сделаны следующие выводы:

1. Согласно анализу конкурентных технических решений установлено, что конкурентные методы имеют ряд недостатков, исключаемых разработанной моделью. Ранее разработанная сотрудниками ОЯТЦ модель позволяет существенно снизить финансовые затраты, обеспечивает высокую

точность расчетных значений и имеет высокий потенциал развития в дальнейшем.

2. В ходе планирования научно-исследовательских работ определен перечень работ, выполняемый рабочей группой. В данном случае рабочая группа состоит из двух человек: руководитель (профессор) и студент (Турбина И.А.). На основе временных показателей по каждой из произведенных работ был построен календарный план-график, построенный на основе диаграммы Ганта, по которому можно увидеть, что самая продолжительная по времени работа – это составление пояснительной записки.

3. Бюджет исследования составил 220545,6 руб. Он состоит из материальных затрат (1464 руб.), затрат на оплаты труда (146654,2 руб.), отчислений во внебюджетные фонды (44289,6 руб.) и накладных расходов (27903,6 руб.).

4. Произведена сравнительная характеристика эффективности разработки на основании интегрального показателя эффективности. Реализация проекта в первом исполнении является более эффективным вариантом.

## **5 Социальная ответственность**

В современных условиях одним из основных направлений коренного улучшения всей профилактической работы по снижению производственного травматизма и профессиональной заболеваемости является повсеместное внедрение комплексной системы управления охраной труда, то есть путем объединения разрозненных мероприятий в единую систему целенаправленных действий на всех уровнях и стадиях производственного процесса.

Охрана труда – это система законодательных, социально-экономических, организационных, технологических, гигиенических и лечебно-профилактических мероприятий и средств, обеспечивающих безопасность, сохранение здоровья и работоспособности человека в процессе труда.

Правила по охране труда и техники безопасности вводятся в целях предупреждения несчастных случаев, обеспечения безопасных условий труда работающих и являются обязательными для исполнения рабочими, руководящими, инженерно-техническими работниками.

Опасным производственным фактором, согласно [44], называется такой производственный фактор, воздействие которого в определенных условиях приводят к травме или другому внезапному, резкому ухудшению здоровья.

Вредным производственным фактором называется такой производственный фактор, воздействие которого на работающего в определенных условиях приводит к заболеванию или снижению трудоспособности.

### **5.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов**

Производственные условия на рабочем месте характеризуются наличием опасных и вредных факторов, которые классифицируются по группам элементов: физические, химические, биологические, психофизиологические.

Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы

Наименование видов работ и параметров производственного процесса	ФАКТОРЫ ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
Работа на ПЭВМ Отделение ОЯТЦ НИ ТПУ	—	Электрический ток	ГОСТ Р 12.1.019-2009. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты
	Воздействие радиации (ВЧ, УВЧ, СВЧ и так далее)	—	СанПиН 1.2.3685-21 Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания»
	—	Пожарная безопасность	Пожаро- и взрывобезопасность промышленных объектов. ГОСТ Р 12.1.004-91 ССБТ Пожарная безопасность

На студента, работающего на компьютере, воздействуют следующие факторы:

- физические: температура и влажность воздуха; шум; статическое электричество; электромагнитное поле низкой частоты; освещённость; наличие излучения;
- психофизиологические.

Психофизиологические опасные и вредные производственные факторы, делятся на: физические перегрузки (статические, динамические) и нервно-психические перегрузки (умственное перенапряжение, монотонность труда, эмоциональные перегрузки).

## **5.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ПЭВМ**

### **5.2.1 Организационные мероприятия**

Весь персонал обязан знать и строго соблюдать правила техники безопасности. Обучение персонала технике безопасности и производственной санитарии состоит из вводного инструктажа и инструктажа непосредственно на рабочем месте ответственным лицом.

Проверка знаний правил техники безопасности проводится квалификационной комиссией или лицом ответственным за рабочее место после обучения на рабочем месте. После чего сотруднику присваивается соответствующая его знаниям и опыту работы квалификационная группа по технике безопасности и выдается удостоверение специального образца.

Лица, обслуживающие электроустановки не должны иметь увечий и болезней, мешающих производственной работе. Состояние здоровья устанавливается медицинским освидетельствованием перед устройством на работу.

### 5.2.2 Технические мероприятия

Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации. То, что требуется для выполнения работ чаще должно располагаться в зоне легкой досягаемости рабочего пространства, как показано на рисунке 5.1.

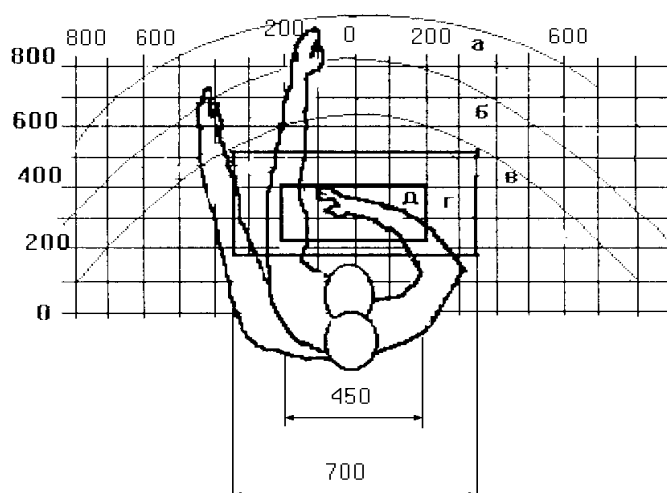


Рисунок 5.1 – Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости

а – зона максимальной досягаемости рук; б – зона досягаемости пальцев при вытянутой руке; в – зона легкой досягаемости ладони; г – оптимальное пространство для грубой ручной работы; д – оптимальное пространство для тонкой ручной работы.

Оптимальное размещение предметов труда и документации в зонах досягаемости рук:

- дисплей размещается в зоне а (в центре);
- клавиатура – в зоне г/д;
- системный блок размещается в зоне б (слева);
- принтер находится в зоне а (справа);
- документация размещается в зоне легкой досягаемости ладони

– (слева) литература и документация, необходимая при работе; в выдвижных ящиках стола – литература, не используемая постоянно.

При проектировании письменного стола должны быть учтены следующие требования.

Высота рабочей поверхности стола рекомендуется в пределах 680–800 мм. Высота рабочей поверхности, на которую устанавливается клавиатура, должна быть 650 мм. Рабочий стол должен быть шириной не менее 700 мм и длиной не менее 1400 мм. Должно иметься пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной – не менее 500 мм, глубиной на уровне колен – не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног – не менее 650 мм.

Рабочее кресло должно быть подъёмно-поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а также расстоянию спинки до переднего края сиденья. Рекомендуется высота сиденья над уровнем пола 420 – 550 мм. Конструкция рабочего кресла должна обеспечивать: ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400 мм; поверхность сиденья с заглублённым передним краем.

Монитор должен быть расположен на уровне глаз оператора на расстоянии 500 – 600 мм. Согласно нормам, угол наблюдения в горизонтальной плоскости должен быть не более 45° к нормали экрана. Лучше если угол обзора будет составлять 30°. Кроме того должна быть возможность выбирать уровень контрастности и яркости изображения на экране.

Должна предусматриваться возможность регулирования экрана:

- по высоте +3 см;
- по наклону от 10 до 20 градусов относительно вертикали;
- в левом и правом направлениях.

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100 – 300 мм от края. Нормальным положением клавиатуры является её размещение на уровне локтя оператора с углом наклона к горизонтальной плоскости 15°. Более удобно работать с клавишами, имеющими вогнутую поверхность, четырёхугольную форму с закруглёнными углами. Конструкция



клавиши должна обеспечивать оператору ощущение щелчка. Цвет клавиш должен контрастировать с цветом панели.

При однообразной умственной работе, требующей значительного нервного напряжения и большого сосредоточения, рекомендуется выбирать неяркие, малоконтрастные цветочные оттенки, которые не рассеивают внимание (малонасыщенные оттенки холодного зеленого или голубого цветов). При работе, требующей интенсивной умственной или физической напряженности, рекомендуются оттенки тёплых тонов, которые возбуждают активность человека.

### 5.2.3 Условия безопасной работы

Основные параметры, характеризующие условия труда – это микроклимат, шум, вибрация, электромагнитное поле, излучение, освещённость.

Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата устанавливаются в соответствии с [44] и приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Оптимальные и допустимые параметры микроклимата

Период года	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный и переходный	23–25	40–60	0,1
Тёплый	23–25	40	0,1

К мероприятиям по оздоровлению воздушной среды в производственном помещении относятся: правильная организация вентиляции и кондиционирования воздуха, отопление помещений. Вентиляция может

осуществляться естественным и механическим путём. В помещение должны подаваться следующие объёмы наружного воздуха: при объёме помещения до  $20 \text{ м}^3$  на человека – не менее  $30 \text{ м}^3$  в час на человека; при объёме помещения более  $40 \text{ м}^3$  на человека и отсутствии выделения вредных веществ допускается естественная вентиляция.

Система отопления должна обеспечивать достаточное, постоянное и равномерное нагревание воздуха. В помещениях с повышенными требованиями к чистоте воздуха должно использоваться водяное отопление. Параметры микроклимата в используемой лаборатории регулируются системой центрального отопления, и имеют следующие значения: влажность – 40%, скорость движения воздуха – 0,1 м/с, температура летом –  $20 - 25 \text{ }^\circ\text{C}$ , зимой –  $13 - 15 \text{ }^\circ\text{C}$ . В лаборатории осуществляется естественная вентиляция. Воздух поступает и удаляется через щели, окна, двери. Основной недостаток такой вентиляции в том, что приточный воздух поступает в помещение без предварительной очистки и нагревания.

Шум и вибрация ухудшают условия труда, оказывают вредное воздействие на организм человека, а именно, на органы слуха и на весь организм через центральную нервную систему. В результате этого ослабляется внимание, ухудшается память, снижается реакция, увеличивается число ошибок при работе. Шум может создаваться работающим оборудованием, установками кондиционирования воздуха, осветительными приборами дневного света, а также проникать извне. При выполнении работы на ПЭВМ уровень шума на рабочем месте не должен превышать 50 дБ.

Экран и системные блоки производят электромагнитное излучение. Основная его часть происходит от системного блока и видео-кабеля.

Согласно [44] напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг экрана по электрической составляющей должна быть не более:

- в диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц – 25 В/м;
- в диапазоне частот 2 кГц – 400 кГц – 2,5 В/м.

Плотность магнитного потока должна быть не более:

- в диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц – 250 нТл;
- в диапазоне частот 2 кГц – 400 кГц – 25 нТл.

Существуют следующие способы защиты от ЭМП:

- увеличение расстояния от источника (экран должен находиться на расстоянии не менее 50 см от пользователя);
- применение приэкранных фильтров, специальных экранов и других средств индивидуальной защиты.

При работе с компьютером источником ионизирующего излучения является дисплей. Под влиянием ионизирующего излучения в организме может происходить нарушение нормальной свертываемости крови, увеличение хрупкости кровеносных сосудов, снижение иммунитета и др. Доза облучения при расстоянии до дисплея 20 см составляет 50 мкР/час. По нормам [44] конструкция ЭВМ должна обеспечивать мощность экспозиционной дозы рентгеновского излучения в любой точке на расстоянии 5 см от экрана не более 100 мкР/час.

Утомляемость органов зрения может быть связана как с недостаточной освещенностью, так и с чрезмерной освещенностью, а также с неправильным направлением света.

### **5.3 Электробезопасность**

В зависимости от условий в помещении опасность поражения человека электрическим током увеличивается или уменьшается. Не следует работать с ЭВМ в условиях повышенной влажности (относительная влажность воздуха длительно превышает 75 %), высокой температуры (более 35 °С), наличии токопроводящей пыли, токопроводящих полов и возможности одновременного прикосновения к имеющим соединение с землей металлическим элементам и металлическим корпусом электрооборудования. Оператор ЭВМ работает с электроприборами: компьютером (дисплей, системный блок и т.д.) и

периферийными устройствами. Существует опасность поражения электрическим током в следующих случаях:

- при непосредственном прикосновении к токоведущим частям во время ремонта ЭВМ;
- при прикосновении к нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением (в случае нарушения изоляции токоведущих частей ЭВМ);
- при прикосновении с полом, стенами, оказавшимися под напряжением;
- при коротком замыкании в высоковольтных блоках: блоке питания и блоке дисплейной развёртки.

Действие электрического тока на организм человека носит своеобразный и разносторонний характер. Проходя через организм человека, электрический ток производит термическое, электролитическое и биологическое действие.

Термическое действие тока проявляется в ожогах тела, нагреве и повреждении кровеносных сосудов, нервов, мозга и других органов и систем, что вызывает их серьезные функциональные расстройства. Электролитическое действие тока проявляется в разложении крови и других жидкостей в организме, вызывая тем самым значительные нарушения их физико-химических составов, а также ткани в целом. Биологическое действие тока выражается главным образом в нарушении биоэлектрических процессов, свойственных живой материи, с которыми связана ее жизнеспособность.

Мероприятия по обеспечению электробезопасности электроустановок:

- отключение напряжения с токоведущих частей, на которых или вблизи которых будет проводиться работа, и принятие мер по обеспечению невозможности подачи напряжения к месту работы;
- вывешивание плакатов, указывающих место работы;
- заземление корпусов всех установок через нулевой провод;
- покрытие металлических поверхностей инструментов надежной изоляцией;

– недоступность токоведущих частей аппаратуры (заключение в корпуса электропоражающих элементов, заключение в корпус токоведущих частей) [45].

#### **5.4 Пожарная и взрывная безопасность**

Согласно [46], в зависимости от характеристики используемых в производстве веществ и их количества, по пожарной и взрывной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В, Г, Д. Так как помещение по степени пожаровзрывоопасности относится к категории В, т.е. к помещениям с твердыми сгорающими веществами, необходимо предусмотреть ряд профилактических мероприятий.

Возможные причины загорания:

- неисправность токоведущих частей установок;
- работа с открытой электроаппаратурой;
- короткие замыкания в блоке питания;
- несоблюдение правил пожарной безопасности;
- наличие горючих компонентов: документы, двери, столы, изоляция кабелей и т.п.

Мероприятия по пожарной профилактике подразделяются на: организационные, технические, эксплуатационные и режимные.

Организационные мероприятия предусматривают правильную эксплуатацию оборудования, правильное содержание зданий и территорий, противопожарный инструктаж рабочих и служащих, обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности, издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации.

К техническим мероприятиям относятся: соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения, правильное размещение оборудования.

К режимным мероприятиям относятся, установление правил организации работ, и соблюдение противопожарных мер. Для предупреждения возникновения пожара от коротких замыканий, перегрузок и т. д. необходимо соблюдение следующих правил пожарной безопасности:

- исключение образования горючей среды (герметизация оборудования, контроль воздушной среды, рабочая и аварийная вентиляция);
- применение при строительстве и отделке зданий негорюемых или трудно сгораемых материалов;
- правильная эксплуатация оборудования (правильное включение оборудования в сеть электрического питания, контроль нагрева оборудования);
- правильное содержание зданий и территорий (исключение образования источника воспламенения – предупреждение самовозгорания веществ, ограничение огневых работ);
- обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности;
- издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации;
- соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения;
- правильное размещение оборудования;
- своевременный профилактический осмотр, ремонт и испытание оборудования.

При возникновении аварийной ситуации необходимо:

- сообщить руководству (дежурному);
- позвонить в аварийную службу или МЧС – тел. 112;
- принять меры по ликвидации аварии в соответствии с инструкцией.

## **5.5 Выводы по разделу «Социальная ответственность»**

В данном разделе рассмотрены вопросы социальной ответственности, к которым относятся правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности, производственная безопасность, пожарная и взрывная безопасность.

Были рассмотрены специальные правовые нормы трудового законодательства и организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя. Также проведен анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований, также приведены мероприятия по снижению воздействия опасных и вредных факторов на исследователя.

## Выводы

1. С использованием двухмерной математической модели процесса десублимации  $\text{UF}_6$  проведены расчеты динамики заполнения вертикальной погружной емкости с горизонтальным оребрением объемом  $0,06 \text{ м}^3$  при изменении диаметра отверстия в ребрах. Рассчитаны 5 конфигураций центральных отверстий: цилиндр, усеченный конус, усеченный конус и цилиндр, два цилиндра разного диаметра, три цилиндра разного диаметра.

2. Установлено, что емкость объемом  $0,06 \text{ м}^3$  имеет максимальную среднюю производительность  $4,8328 \text{ г/с}$  при конфигурации в виде усеченного конуса с цилиндром, имеющего диаметр  $6,4 \cdot 10^{-2} \text{ м}$  на 1-ом ребре и  $4,4 \cdot 10^{-2} \text{ м}$  на ребрах со 2-го по 13-ое.

3. Показано, что увеличение диаметра отверстия в горизонтальных ребрах с  $6,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}$  до  $6,4 \cdot 10^{-2} \text{ м}$  позволяет увеличить среднюю производительность емкости на  $2,80 \%$ , а использование других конфигураций максимум на  $3,34 \%$ , то есть незначительно.

4. Для простоты изготовления данной емкости рекомендовано использовать конфигурацию центральных отверстий в виде цилиндра с диаметром  $6,4 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ .

Полученные в ходе численного моделирования результаты могут быть использованы в АО «ПО ЭХЗ» при оптимизации конструкции емкости объемом  $0,06 \text{ м}^3$ .



## Список используемых источников

1. Горелик А.Г. Десублимация в химической промышленности / А. Г. Горелик, А.В. Амитин. – Москва : Химия, 1986. – 272 с.
2. Кафаров В.В. Системный анализ процессов химической технологии. Процессы массовой кристаллизации из растворов и газовой фазы / В.В Кафаров, И.Н. Дорохов, Э.М. Кольцова, – Москва : Наука, 1983. – 367 с.
3. Исследование процесса переработки отходов металлургического производства редких металлов методом фторирования и очистка получаемых фторидов от примесей. Исследование процессов сублимации– десублимации тетрафторида титана / А.С. Буйновский, К.Ф. Васильев, А.И. Карелин [и др.] ; Томский политехнический институт. – Томск : ТПИ, 1985. – 49 с.
4. Буйновский А.С. Расчет сублимационно– десублимационных аппаратов / А.С. Буйновский, В.Л. Софронов, И.Ю. Русаков. – Томск: ТПИ, 1987. – 121 с.
5. Пищулин В.П. Десублиматоры гексафторида урана: учебное пособие / В.П. Пищулин, И.Ю. Русаков, – Северск : СГТИ, 2004. – 66 с.
6. Клогина Л.И. Массовая кристаллизация / Л.И. Клогина, А.В. Чеховский, С.Н. Булатов [и др.]. – Москва : ИРЭА, 1975, – № 1, 119 с.
7. Хаузен Х. Теплопередача при противотоке, прямотоке и перекрестном токе: пер. с англ. / Х. Хаузен. – Москва : Энергоиздат, 1981. – 383 с.
8. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. / Д.А. Франк-Каменецкий – Москва : Наука, 1987. – 492 с.
9. Андреев Г.Г., Пермяков О.Е. Химическая кинетика гетерогенных некаталитических процессов в технологии ядерного топлива: учебное пособие. / Г.Г. Андреев, О.Е. Пермяков – Томск, 2000. – 83 с.
10. Амелин А.Г. Теоретические основы образования тумана при конденсации пара / А.Г. Амелин – Москва : Химия, 1972. – 304 с.

11. Фролов Ю.Г. Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы – 2-е изд., переработанное и дополненное: учебник для вузов / Ю.Г. Фролов. – Москва : Химия, 1983. – 464 с.
12. Щукин Е.Д. Коллоидная химия / Е.Д. Щукин, А.В. Перцов, Е.А. Амелина – Москва : Высшая школа, 1992. – 416 с.
13. Грин Х. Аэрозоли – пыли, дымы и туманы: Пер. с англ. / Под ред. Н.А. Фукса. / Х. Грин, В. Лейн – Ленинград : Химия, 1969. – 428 с.
14. Русанов А.И. / Доклады академии наук СССР. – 1981. – Т. 261. – № 3. – С. 700.
15. Райст П. Аэрозоли. Введение в теорию: Пер. с англ. / П. Райст – Москва : Мир, 1987. – 320 с.
16. Буйновский А.С. Переработка элементарным фтором сырья и отходов, содержащих титан, цирконий, гафний и ее физико-химические основы / А.С. Буйновский – Томск, ТПИ. 1988. – 403 с.
17. М.Н. Ну. Development of a parallelized 2D/2D-axisymmetric Navier-Stokes equation solver for all-speed gas flows // Comput. Fluids № 45. – 2011. P. 241- 248.
18. Математическая модель и результаты численных расчетов перелива  $UF_6$  в присутствии микроколичеств легких примесей / И.М. Васенин, А.Ю. Крайнов, А.А. Шахтини [и др.] // Вестник Томского государственного университета. – 2010. – № 2 (10). – С. 53-59.
19. Исследование возможности увеличения степени очистки  $UF_6$  на промежуточных стадиях переработки / И.М. Васенин, А.Ю. Крайнов, А.А. Шахтиннов [и др.] // Вестник Томского государственного университета. – 2010. – № 4 (12). – С. 78-82.
20. Мейрманов А.М. Задача Стефана / А.М. Мейрманов. – Новосибирск : Наука, 1986. – 240 с.
21. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: учебник для ВУЗов / А.Г. Касаткин – Москва: Химия, 1971. – 178 с.

22. Есютин В.С. Разработка и освоение сублиматора непрерывного действия для получения высококачественного тетрафторида циркония: Отчет о НИР (промежуточный) / Институт металлургии и обогащения г. Алма-Ата. – Москва : Днепродзержинск, 1982. – 30 с.

23. Вильнина А.В. Экспериментальное исследование процесса десублимации от длительности цикла захолаживания / А.В. Вильнина, В.Ф. Дядик, С.А. Байдали [и др.] // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315. – № 2. – С. 91-93.

24. Вильнина А.В. Адаптивный алгоритм управления узлом десублимации гексафторида урана / А.В. Вильнина, С.В. Ливенцов // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 312. – № 5 – С. 133-136.

25. Malyugin, R.V. Desublimation for purification and transporting UF<sub>6</sub>: process description and modeling / A.A. Orlov, A.F. Tsimbalyuk, R.V. Malyugin // Separation & Purification Reviews. – 2017 – Vol. 46. – № 1. – P. 81– 89.

26. Орлов. А.А. Газофазные методы разделения / А.А. Орлов. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2009. – 286 с.

27. Губанов С.М. Численное моделирование охлаждения емкостей для десублимации паров / С.М. Губанов, А.Ю. Крайнов // Компьютерные исследования и моделирование. – 2011. – Т. 3. – № 4. – С. 383 – 388.

28. Весенин И.М. Математическая модель и результаты численных расчетов перелива UF<sub>6</sub> в присутствии микроколичеств легких примесей / И.М. Васенин, А.Ю. Крайнов, А.А. Шахтин и др. // Известия Томского государственного университета. – 2010. – № 2. – С. 53-59.

29. Губанов С.М. Математическая модель и результаты численных расчетов охлаждения осадительных емкостей при десублимации потока UF<sub>6</sub> и легких примесей / С.М. Губанов, А.Ю. Крайнов // Вестник Томского государственного университета. – 2012. – № 4. – С. 56-65.

30. Смолкин П.А. Математическая модель для определения тепловых условий процесса десублимации летучих фторидов металлов / П.А. Смолкин,

А.С. Буйновский, В.В. Лазарчук и др. // Известия Томского политехнического Университета. – 2007. – Т. 310. – № 3. – С. 80-85.

31. Софронов В.Л. Контроль и управление процессом десублимации летучих фторидов металлов / В.Л. Софронов, А.А. Глата, П.А. Смолкин // Цветные металлы. – 2012. – № 1. – С. 27-30.

32. Галкин Н.П. Химия и технология фтористых соединений урана / Н.П. Галкин – Москва : Госатомиздат, 1961. – 349 с.

33. Тураев Н.С. Химия и технология урана / Н.С. Тураев, И.И. Жерин – Москва : Издательский дом «Руда и Металлы», 2006. – 396 с.

34. Андреев Г.Г. Введение в химическую технологию ядерного топлива / Г.Г. Андреев, А.Н. Дьяченко. – Томск: Издательство ТПУ, 2008. – 150 с.

35. Ежов В.К. Промышленная ректификационная установка для глубокой очистки сублиматного гексафторида урана // Атомная энергия. – 2007. – Т. 103. – № 5. – С. 314-317.

36. Байдали С.А., Дядик В.Ф., Юрков А.С. Математическая модель производства гексафторида урана // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315. – № 2. – С. 84-90, 94

37. Белозеров Б.П., Русаков И.Ю., Андреев Г.Г. и др. Анализ процесса и аппаратуры для десублимации гексафторида урана и других летучих фторидов // Цветные металлы. – 2012. – № 1. – С. 58-61.

38. Виноградов С.Н. Выбор и расчет теплообменников / С.Н. Виноградов, К.В. Таранцев, О.С. Виноградов – Пенза: Издательство Пензенского государственного университета, 2001. – 100 с.

39. Вильнина А.В. Адаптивный алгоритм управления узлом десублимации гексафторида урана / А.В. Вильнина, С.В. Ливенцов // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 312. – № 5 – С. 133-136.

40. Губанов С.М. Численное моделирование охлаждения емкостей для десублимации паров / С.М. Губанов, А.Ю. Крайнов // Компьютерные исследования и моделирование. – 2011. – Т. 3. – № 4. – С. 383-388.

41. Видяев И.Г. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно– методическое пособие / И.Г. Видяев, Н.А. Гаврикова, Г.Н. Серикова. – Томск: НИ ТПУ, 2014. – 36 с.

42. Скворцов Ю.В. Организационно-экономические вопросы в дипломном проектировании: учебное пособие / Ю.В. Скворцов – Москва : Высшая школа, 2006. – 399 с.

43. Российская Федерация. Трудовой кодекс Российской Федерации. Об основах охраны труда в Российской Федерации: Федеральный закон №197 – ФЗ : [принят Государственной думой 30 декабря 2001 года (ред. от 30.04.2021)] – Москва, 2001. – 158 с.

44. СанПиН 1.2.3685-21. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». – URL : <https://docs.cntd.ru/document/573500115> (дата обращения: 28.04.2021). – Текст: электронный.

45. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов. Дата введения: 1983-07-01. – URL : <https://docs.cntd.ru/document/5200313> (дата обращения: 25.04.2021). – Текст: электронный.

46. ГОСТ Р12.1.00-91 ССБТ. Пожарная безопасность. Дата введения: 1992-07-01. – URL : <https://docs.cntd.ru/document/9051953> (дата обращения: 23.04.2021). – Текст: электронный.